



27-31 octobre 2014

Palais Beaumont

24<sup>e</sup>  
Réunion  
des Sciences  
de la Terre

<http://rst2014-pau.sciencesconf.org>



---

# Résumés

de la 24<sup>e</sup> Réunion  
des Sciences de la Terre

---

*Abstracts*



# Résumés de la 24<sup>e</sup> Réunion des Sciences de la Terre

## Abstracts

Université de Pau et des Pays de l'Adour



[rst2014-pau@sciencesconf.org](mailto:rst2014-pau@sciencesconf.org)

<http://rst2014-pau.sciencesconf.org>





# Table des matières

<b>1</b>	<b>Processus de surface</b>	<b>7</b>
1.1	Géomorphologie : observation des objets naturels et processus	7
1.2	Quantification des processus de surface	12
1.3	Morphodynamique des zones littorales – architectures, dynamiques aux échelles de temps longues, résilience et effets anthropiques	21
1.4	Paléaltérations et paléoenvironnements	25
1.5	Dynamique de la lithosphère et déformations actives : Intégration multi-méthodes de la géodésie à la paléo-sismologie (CNFGG)	28
1.6	Imagerie des failles actives (CNFGG)	33
1.7	Aléa et risques naturels (CNFGG)	38
1.8	Observation de la Terre, télédétection	48
1.9	Processus d'évolution des surfaces planétaires	52
1.10	Géomagnétisme et archéologie : retracer la variation séculaire du champ géomagnétique et applications en datation (CNFGG)	56
<b>2</b>	<b>Processus sédimentaires</b>	<b>59</b>
2.1	Dynamique des bassins sédimentaires, environnements de dépôt et paléogéographies (ASF)	59
2.2	Mouvements verticaux et bilan des flux sédimentaires à l'échelle des marges (ASF, affiliée au programme CNRS/INSU Actions Marges)(transverse thème 1)	74
2.3	Systèmes Sédimentaires Réservoirs (ASF)	81
2.4	Processus et enregistrements sédimentaires dans les canyons et les bassins profonds (ASF)	87
2.5	La remobilisation sédimentaire, de l'observation aux phénomènes physiques sous-jacents (ASF)	99
2.6	Processus hydro-sédimentaires en domaine littoral (ASF)	108
2.7	Dépôt, authigenèse et diagenèse des sédiments riches en matière organique : l'empreinte biogéochimique de l'activité des micro-organismes (ASF)	114
2.8	Plates-formes carbonatées, évaporites et évolution des écosystèmes (ASF)	120
<b>3</b>	<b>Dynamique interne</b>	<b>125</b>
3.1	Noyaux planétaires (SEDI)	125
3.2	Les roches basiques et ultrabasiques : bilan et perspectives (SFMC)	128
3.3	Dynamique des systèmes magmatiques intrusifs et extrusifs, et leurs relations avec la tectonique et la géodynamique (CNFGG)	134
3.4	De la rupture lithosphérique à la dorsale médio-océanique « établie » : processus mantelliques, tectoniques, magmatiques et hydrothermaux (SFMC)	143
3.5	Dynamique des marges passives : du rifting au post-rift (associée Actions Marges)	148
3.6	Géodynamique des zones de subduction océanique : Des observations aux modèles	158
3.7	Subduction et orogènes	166
3.8	Dynamique des orogènes	176
3.9	Dynamique alpine : des structures profondes aux processus de surface	190
3.10	Evolution des fronts de chaînes	198
3.11	Interactions déformation-sédimentation	210
3.12	Processus de transfert dans les failles : peut-on réconcilier les différentes échelles temporelles impliquées ?	216
<b>4</b>	<b>Pyrénées</b>	<b>219</b>
4.1	Pollutions et environnements pyrénéens	219
4.2	Des rifts à la chaîne de montagne : l'exemple des Pyrénées	226
<b>5</b>	<b>Paléoenvironnements</b>	<b>247</b>
5.1	Paléobiosphère : évolution et facteurs de contrôle	247
5.2	Evolution de la Terre et de la vie au Précambrien (ASF)	251
5.3	Bouleversements paléoenvironnementaux du Phanérozoïque (ASF)	256
5.4	Variabilité climatique au Cénozoïque (ASF)	263
5.5	Techniques de datation du Quaternaire : nucléides cosmogéniques, OSL, U/Th, magnétostratigraphie (transverse thème 1)	273
5.6	Les biomarqueurs moléculaires comme proxys biogéochimiques, (paléo)environnementaux et (paléo)climatiques (transverse thème 8)	278

<b>6</b>	<b>Physique des roches</b>	<b>285</b>
6.1	Propriétés pétrophysiques des roches et applications au monitoring géophysique . . . . .	285
6.2	Propriétés de transport et leurs couplages (CNFGG) . . . . .	291
6.3	Physique des zones de failles et de fractures (CNFGG) . . . . .	297
6.4	Propriétés mécaniques et pétrophysiques des formations réservoirs et de leur environnement . . . . .	302
6.5	Apports de la pétrophysique dans la caractérisation des réservoirs sédimentaires : applications aux systèmes carbonatés . . . . .	306
6.6	Transport dans les roches très peu perméables : quels outils expérimentaux, quelles modélisations ? . . . . .	310
6.7	Comportements hydro-mécaniques et chimiques des géo-barrières des échelles microscopiques à macroscopiques . . . . .	316
6.8	Géotechnique et densification du tissu urbain . . . . .	319
<b>7</b>	<b>Ressources</b>	<b>323</b>
7.1	Stockage Géologique du CO <sub>2</sub> (Geologic storage of CO <sub>2</sub> ) . . . . .	325
7.2	Hydrogène souterrain : stockage et production naturelle (SFMC) . . . . .	332
7.3	Monazite : un marqueur des processus crustaux. Avancées et développements récents (SFMC) . . . . .	338
7.4	Archéométrie - Géoarchéologie . . . . .	344
7.5	<i>Colloque de Launay</i> - Afrique : Quoi de neuf en métallogénie ? . . . . .	352
7.6	<i>Colloque de Launay</i> - Approches innovatrices, analytiques ou expérimentales, dans l'étude des gisements . . . . .	360
7.7	<i>Colloque de Launay</i> - Processus de formation et types de gisements métallifères . . . . .	367
7.8	12 <sup>e</sup> <i>Colloque Annuel du Groupe Français des Argiles</i> . . . . .	382
<b>8</b>	<b>Environnement</b>	<b>393</b>
8.1	Nanoparticules, colloïdes et environnement . . . . .	394
8.2	Spéciation et dynamique des métaux dans les sols, interactions avec les microorganismes . . . . .	403
8.3	Rôle de la végétation sur le transfert des éléments chimiques . . . . .	413
8.4	Rôle des microorganismes sur le devenir des hydrocarbures dans les différents compartiments terrestres . . . . .	420
8.5	Biogéochimie du mercure . . . . .	425
8.6	Les isotopes stables non-traditionnels comme traceurs biogéochimiques (SFIS) . . . . .	430
8.7	Cycles biogéochimiques des contaminants en Arctique . . . . .	436
8.8	Geochemistry of salted solutions and Mobilization of hazardous trace elements in freshwater aquifers in response to CO <sub>2</sub> leakage from deep geological storage . . . . .	440
<b>9</b>	<b>Hydrosciences</b>	<b>447</b>
9.1	Processus hydrochimique et isotopique dans les eaux souterraines . . . . .	447
9.2	Hydrogéologie quantitative (CNFGG) . . . . .	451
9.3	Transport réactif, pollution, atténuation naturelle . . . . .	458
9.4	Caractérisation et transfert en milieux karstiques (AFK, IAH Karst commission, CNFGG) . . . . .	462
<b>10</b>	<b>Grands programmes</b>	<b>469</b>
10.1	Les Très Grands Instruments au service des Sciences de la Terre : avancées récentes et développements analytiques (SFMC) . . . . .	469
10.2	La place des "Très Grandes Infrastructures de Recherche" dans le paysage des géosciences françaises . . . . .	477
10.3	Géosciences en régions polaires et sub-polaires . . . . .	479
10.4	L'expérimentation de laboratoire et terrain . . . . .	485
10.5	Le Référentiel Géologique de la France . . . . .	490
10.6	Médiation et patrimoine . . . . .	494
10.7	Des Mathématiques aux simulations numériques pour les Géosciences . . . . .	502
<b>11</b>	<b>Forum Enseignement</b>	<b>505</b>
11.1	« Comprendre et Enseigner les Géosciences » . . . . .	505
<b>12</b>	<b>Forum des Métiers</b>	<b>511</b>
12.1	« Forum des Métiers » . . . . .	511
	<b>Conférences</b>	<b>513</b>
	Conférence plénière . . . . .	513
	Conférence grand public . . . . .	513
	<b>Liste des associations, laboratoires, écoles et organismes</b>	<b>515</b>
	<b>Index des auteurs</b>	<b>521</b>
	<b>Partenaires de la RST2014</b>	<b>537</b>

Par souci de clarté, les acronymes de certains laboratoires, écoles et organismes ont été utilisés dans les résumés de communications qui suivent. Les noms et affiliations de ces laboratoires, écoles et organismes sont consultables à partir de la page [515](#).

*For clarity, the acronyms of laboratories, schools and organizations have been used in the abstracts below. The names and affiliations of these laboratories, schools and organizations are shown at page [515](#).*

Les titres de communications précédés du sigle (o), (p), (a) sont des communications respectivement orales, sous la forme de poster et sous la forme d'un atelier pédagogique.

*The titles of communications preceded by the abbreviation (o), (p), (a) respectively are oral communications, posters and educational workshops.*

---



# Thème 1

## Processus de surface - *Surface processes*

Animateurs : Bertrand Nivière (LFC-R, Pau), Vincent Regard (GET, Toulouse)

### 1.1 Géomorphologie : observation des objets naturels et processus

#### Responsables :

- Gérard Hérial (GET, Toulouse)  
gerard.herail@get.obs-mip.fr
- Bernard Delcaillau (Université de Caen Basse Normandie)  
bernard.delcaillau@unicaen.fr

#### Résumé :

Toutes les formes de relief sont une des signatures des processus géodynamiques internes et/ou externes et constituent en cela une source directe d'information sur l'évolution de la surface de la Terre. L'observation couplée des formes et des sédiments associés permet en outre de préciser les processus. Ceci ajouté au fait que les outils d'observation spatiale de la Terre sont de plus en plus utilisés et fournissent des images de la morphologie de la surface couvrant de très grandes étendues rend nécessaire de revenir sur la signification, en termes de géomorphogénèse, des objets naturels préservés en surface (formes, altérites et sédiments associés).

Cette session sera l'occasion de réunir l'ensemble de cette communauté pour traiter de l'enregistrement dans des objets naturels (formes de terrain mais aussi dépôts) des différents processus de géomorphogénèse et des critères d'interprétation de ce signal en terme d'évolution du relief. Les présentations et les posters se rapportant à ces thèmes seront donc privilégiés. Nous attendons des contributions à la fois sur les formes de reliefs issues des déformations actives, les formes héritées, la géomorphologie côtière, les processus d'érosion, l'altération supergène des roches, l'ablation et le stockage des produits mobilisés, l'évolution des réseaux de drainage et les formations superficielles et ceci aux différentes échelles spatiales et sans négliger les formes qui se développent sur de longues (la dizaine de million d'années) périodes.

### 1.1.1 (o) Origine de l'approfondissement des grandes vallées alpines : ni érosion fluviale ni érosion glaciaire, mais effondrement tectonique

Gilles Ménard<sup>1</sup>, Fabien Hobléa<sup>1</sup>, Elsa Hugot<sup>2</sup>, Lidia Vinol-Lelarge<sup>3</sup>,  
 Nathalie Monin<sup>4</sup>, Naïma Sabil<sup>5</sup>

<sup>1</sup>EDYTEM, Université de Savoie, Le Bourget du Lac

<sup>2</sup>LTF (Lyon Turin Ferroviaire), Chambéry

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brésil

<sup>4</sup>BG ingénieurs Conseils, Lyon

<sup>5</sup>Université de Munich, Allemagne

La question de l'origine des vallées alpines a toujours privilégié le rôle exclusif de l'érosion, le débat s'étant cantonné à l'importance relative des érosions fluviale et glaciaire, les positions extrêmes étant défendues par les anti-glacialistes et les ultra-glacialistes (un compromis a consisté à attribuer le creusement principalement aux rivières, les glaciers n'étant responsables que des surcreusements). Le rôle de failles, lorsqu'il a été proposé, se réduisait à offrir des zones de moindre résistance à l'érosion. Deux ensembles d'arguments nous conduisent à proposer un nouveau modèle de formation des vallées alpines accordant un rôle majeur à l'effondrement tectonique. (1) Des arguments morphostructuraux ? Le basculement d'au moins un des versants des vallées, étendant l'observation déjà ancienne de Lugeon (1901) selon laquelle un certain nombre de vallées transversales alpines étaient superposées à des ensembles axiaux (synclinaux transverses), traduit une extension tardive. (2) Des arguments thermochronologiques ? La dispersion systématique dans l'espace altitude-âge des âges TF sur apatite est attribué non pas à une dispersion aléatoire des datations (le caractère aléatoire de cette dispersion est infirmé par une dispersion des âges TF sur zircon corrélée à celle des apatites), mais à des mouvements verticaux relatifs tardifs postérieurs à l'acquisition des âges. Cette extension, expression de l'effondrement gravitaire de la chaîne, est favorisée par la surcharge temporaire et localisée que constituent les glaciers. Ainsi les vallées s'approfondiraient bien principalement sous l'action des glaciers (rôle déterminant des glaciers = position ultraglacialiste), mais par extension/effondrement plutôt que par érosion (pas d'érosion glaciaire = position antiglacialiste). Le terme de surapprofondissement doit donc être préféré à celui de surcreusement. Les concepts de verrou/ombilic et de vallée en U/en V sont rediscutés dans le cadre de ce modèle.

### 1.1.2 (o) La surface d'érosion messinienne observée en Syrie, en Turquie et à Chypre. Phases de creusements et remblaiements des canyons en Méditerranée orientale

Ludovic Mocochain<sup>1,2</sup>, Christian Blanpied<sup>1</sup>, Jean-Pierre Suc<sup>3</sup>, Carla Müller<sup>4</sup>, Christian Gorini<sup>3</sup>, Abdel-Karim Al-Abdala<sup>5</sup>, Aski Fawaz<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Total, Paris La Défense

<sup>2</sup>CV-Associés, Bayonne

<sup>3</sup>iSTeP, Paris

<sup>4</sup>Retraitee, Pologne

<sup>5</sup>Université Tichrine, Lattaquié, Syrie

Entre 5,6 et 5,45 Ma, la Méditerranée a connu une chute sans précédent de son niveau marin, atteignant pratiquement ses plaines abyssales à quelques 1500 m de profondeur. D'un point de vue sédimentaire, les conséquences d'un tel évènement se sont traduites par le dépôt d'évaporites concentrées dans les parties les plus distales des bassins orientaux et occidentaux mais également par le dépôt d'importantes séries clastiques aux débouchés des principaux fleuves. Si dans le cas du Rhône et

du Nil, ces dépôts ont fait l'objet de nombreuses études pétrolières, la cause même de leur genèse, celle du creusement de profonds canyons n'a été finalement bien étudiée que dans le midi méditerranéen français. Au cours de ces quatre dernières années, nous avons réalisé plusieurs campagnes de terrain en Méditerranée orientale et notamment à Chypre, en Syrie et en Turquie dans le but d'identifier l'existence, puis de caractériser les modalités de creusement et de remblaiement des canyons messiniens dans cette région. L'approche utilisée fut celle développée par Georges Clauzon, qui consiste à rechercher des marqueurs morphologiques et sédimentaires comme la discordance entre les dépôts fini-miocènes et les dépôts pliocènes, dont la nature érosive est la conséquence de la grande chute du niveau marin. Les résultats de nos recherches montrent que si la discordance messinienne a pu être observée dans la plupart des bassins investigués, la différence réside dans les modalités de remblaiement des rias pliocènes où la sédimentation deltaïque, bien connue en Méditerranée occidentale, en est pratiquement absente. L'autre différence significative est l'identification et l'utilisation plus systématique de deux marqueurs produits par le démantèlement des formations gypseuses déposées au cours du premier temps de la crise, entre 5,95 et 5,6 Ma. Le premier marqueur est la formation à blocs qui correspond à des debris flow très grossiers remaniant des blocs de gypse métriques à pluri-métriques déposés à même la surface d'érosion messinienne. Le second marqueur correspond à des conduits karstiques au sein des gypses, fossilisés par les marnes du Pliocène. Ce dernier marqueur peut être considéré comme le prolongement souterrain de la surface d'érosion messinienne.

### 1.1.3 (o) Topographie transitoire et préservation de paléo-reliefs dans une orogène émergente : l'exemple de la péninsule de Hengchun (Taiwan)

Nicolas Loget<sup>1</sup>, Slawek Giletycz<sup>2</sup>, Frédéric Mouthereau<sup>1</sup>, Chung-Pai Chang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>iSTeP, Paris

<sup>2</sup>Institute of Geophysics, National Central University Chungli, Taiwan

La péninsule de Hengchun au sud de Taiwan constitue l'un des domaines émergés les plus jeunes de l'île de Taiwan. L'unité de Hengchun correspond à la partie émergée du prisme d'accrétion associé à la subduction de la mer de Chine du sud sous la plaque Philippine le long de la fosse des Manilles. L'origine de son soulèvement et de son émergence est aujourd'hui très débattue notamment autour de l'implication d'une croute transitionnelle sous-charriée sous le prisme (McIntosh et al., 2013). La péninsule de Hengchun présente plusieurs traits morphologiques caractéristiques (i) une ligne de partage des eaux présentant une virgation vers l'est et non localisée sur les zones de plus haute altitude sur un transect perpendiculaire (ii) des faibles reliefs N-S perchés (mutan ponds) bordant cette ligne de partage des eaux à l'ouest (iii) des profils de rivière en déséquilibre avec de nombreux knickpoints concentrés autour de cette zone de faible relief et dont certains viennent la capturer. Afin d'expliquer ces caractéristiques morphologiques, une étude géomorphologique ainsi qu'une modélisation des reculs de knickpoint ont été réalisés. Nous montrons ici que la topographie de Hengchun correspondant à une phase transitoire consécutive à un uplift récent de la zone et dont témoignent notamment les paléo-reliefs perchés. Ce soulèvement ne correspond cependant pas à une simple phase de réexcavation du relief puisque les modèles de régression de knickpoint ne permettent d'expliquer qu'une partie des knickpoints recensés. Nous proposons que l'émergence progressive du sud de Hengchun depuis le Pléistocène supérieur soit responsable du rajeunissement du relief mais aussi d'un réarrangement progressive du réseau de drainage avec une capture des paléo-reliefs N-S par des drains transverses globalement E-

W. Les paléo-reliefs N-S représenteraient ainsi le drainage de la terminaison sud de Taiwan avant la dernière phase d'émergence de la péninsule d'Hengchun. La taille de la zone perturbée suggère ici davantage les conséquences d'un sous-charriage associée à la collision arc-continent.

### 1.1.4 (o) Les réseaux de drainage développés sur les séquences de terrasses coralliennes quaternaires de l'île de Sumba (Indonésie), marqueurs de la déformation verticale

Maëlle Nexer<sup>1</sup>, Christine Authemayou<sup>2</sup>, Bernard Delcaillau<sup>1</sup>, Kevin Pedoja<sup>1</sup>

<sup>1</sup>M2C, Caen  
<sup>2</sup>LDO, Plouzané

Les taux de soulèvement sont souvent utilisés pour comprendre les processus géodynamiques à l'échelle de la lithosphère. La quantification des mouvements verticaux quaternaires requiert généralement l'utilisation de marqueurs morphologiques datables tels que les terrasses marines ou fluviatiles. Cependant de nombreuses recherches récentes s'attachent à développer des méthodes de morphologie quantitative permettant l'obtention d'informations tectoniques directement à partir de l'analyse du réseau de drainage actuel. Le domaine côtier est une interface idéale pour contraindre les taux de soulèvement à partir de l'analyse des terrasses marines. L'objectif de ce travail est de déterminer l'existence d'une corrélation entre la maturité du relief côtier et les taux de soulèvement. Nous avons pour cela choisi de nous focaliser sur l'île de Sumba, située dans une zone de transition entre une subduction océanique et une collision arc-continent. Les taux de soulèvement (faibles à modérés) ont été contraints à l'aide de l'altitude des terrasses coralliennes. Le climat et l'homogénéité de la lithologie de ces zones côtières nous ont permis d'isoler l'influence du soulèvement tectonique sur la morphologie du drainage. Huit indices morphométriques ont été calculés à partir de l'analyse de MNT (relief résiduel, incision, SL index, Ksn, intégrale hypsométrique, aire drainée, relief géophysique, facteur de forme des bassins). Les taux de corrélation entre ces différents paramètres et les taux de soulèvement ont révélé la sensibilité de chacun face au signal tectonique. Cette analyse permet de mieux comprendre l'érosion des zones littorales recouvertes de récifs coralliens soumis à un forçage tectonique et ainsi, de cibler les meilleurs paramètres morphométriques utilisables lors d'une analyse tectonique en contexte géographique.

### 1.1.5 (o) Relations entre vitesses de surrection, séquences de récifs fossiles, et morphologie littorale actuelle : l'exemple de Buton, SE Sulawesi

Laurent Husson<sup>1</sup>, Kevin Pedoja<sup>2</sup>, Antoine Bezos<sup>3</sup>, Anne-Morwenn Pastier<sup>3</sup>, Maëlle Nexer<sup>2</sup>, Christine Authemayou<sup>4</sup>, Mary Elliot<sup>3</sup>, Caroline Dumoulin<sup>3</sup>, Gaël Choblet<sup>3</sup>, Vincent Regard<sup>5</sup>, Edwige Pons-Branchu<sup>6</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble  
<sup>2</sup>M2C, Caen  
<sup>3</sup>LPG, Nantes  
<sup>4</sup>LDO, Plouzané  
<sup>5</sup>GET, Toulouse  
<sup>6</sup>LSCE, Gif-sur-Yvette

L'archipel de Buton présente une archive récifale inégale, avec des séquences comprenant jusqu'à 40 terrasses de paléo-récifs superposées jusqu'à 700 mètres d'altitude. La cinématique de déformation, quantifiée par des mesures altimétriques (dGPS) et bathymétriques (sonar), et

des datations U/Th, met évidence trois unités aux comportements tectoniques très variés : surrection uniforme, basculement et plissement. La cinématique d'un anticlinal est exprimée par la dilatation et condensation graduelle des séquences récifales. Si cette dilatation est suffisante, comme dans le cœur de l'anticlinal où la surrection est la plus rapide, les bas niveaux marins apparaissent. Les variations latérales rapides des taux de surrections montrent que la cinématique est le facteur essentiel du développement des séquences récifales, mais aussi de la morphologie actuelle. Ces observations, explorées à l'aide de modèles numériques de croissance récifale révèlent l'existence de plusieurs régimes : les vitesses de surrection nulles ou modérées favorisent le développement de larges récifs sur les plateformes du MIS 5a et MIS 5c. Les récifs deviennent plus étroits lorsque les vitesses de surrection deviennent rapides, puis presque inopérants. L'augmentation des vitesses de subsidence inhibe également la croissance récifale, au profit de plaines alluviales et de mangroves.

### 1.1.6 (p) Reorganization and incision dynamics of West African Rivers since the Eocene

Jean-Louis Grimaud<sup>1,2</sup>, Dominique Chardon<sup>1</sup>, Delphine Rouby<sup>1</sup>, Anicet Beauvais<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse  
<sup>2</sup>St Anthony Fall Lab, Minneapolis, États-Unis  
<sup>3</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

Surface dynamics of non-orogenic domains (platforms, shields and post-rift divergent margins) reflects the response of the largest exposed landmass to climate change and lithospheric deformation. In these slowly eroding contexts, drainage evolution and incision dynamics exert a first-order role in sediment exports to the continental margins. Our understanding of such drainage systems on geological time scales is still very poor because their incision ranges are rarely detectable by low-temperature thermochronology and/or the lack of reliable geological markers of their past base levels. Here we investigate the map pattern and longitudinal profile evolution of the West African rivers based on dated and regionally correlated incision markers recording stepwise dissection of a low-relief Eocene topography at ca. 24, 11 and 6 Ma. Reconstruction the Eocene and Latest Oligocene (ca. 24 Ma) topography of West Africa combined with paleogeographic sedimentary environment maps shows that the current river catchments of the sub region had already acquired their current configuration by the end of the Oligocene and most probably since 30 Ma, following the dissection of a marginal upwarp by a short coastal river. The spatial stability of both the river outlets and divides imposed increasing concavity of the river long profiles through time. Incision remained mostly below 10 m/my with a mean around 5 m/my. Rivers evolved by spatially contrasted adjustment of river segments bounded by recurrent lithogenic knickzones with apparently no simple relation to base level change. Therefore, knickzones may not be used as gauges of base level falls, as implied in most models of river profile adjustment to surface uplift. Very slow incision has however allowed amplification of the Hoggar swell and flexural uplift of the continental margin to be recorded by river profiles by long wavelength warping.

### 1.1.7 (p) Geomorphologic evidences for Pliocene shortening in the Southern Neuquén Basin (40°S, Argentina)

Damien Huyghe<sup>1,2</sup>, Bertrand Nivière<sup>1</sup>, Cédric Bonnel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau  
<sup>2</sup>GET, Toulouse

During their history, orogenic belts and their associated retro-foreland basins created in subduction setting can undergo both shortening or back arc extension. In the retro-side of the Southern Central Andes, the Neuquén Foreland Basin experienced alternations of periods of shortening, quiescence and extension since the lower Cretaceous. Shortening is recorded since the Cretaceous, after a long extensive phase initiated during the Triassic. The last compressional phase occurred during the middle Miocene and lasted until at least the middle Pliocene. Its recent history is however subject to debate. Some authors argued that the basin evolved towards an extensive phase, according to structural, geophysical and geochemical arguments, whereas other works proposed that it remained compressive according to structural, geomorphologic and sedimentologic evidences.

In this controversial context, the aim of this work is to bring new arguments to this debate from geomorphologic constrains. We focus on a basaltic lava flow (Santo Tomas Fm), dated from the middle to upper Pliocene, which is located on the southern border of the Neuquén basin, on the Pampa Curaco plateau. From the analysis of satellite imagery, digital elevation model and field observations, two observations let us suspect a potential deformation of the lava flow. We illustrate that this lava flow presents a mean general dip of 1-3° to the south, its northernmost part being currently at a higher elevation than its volcanic source (~ 200m). Additionally, the NE and SW borders of the lava flow show a hinge along a nearly N-S to NE-SW axis which is associated with two 60m and 150m high scarps. These folds, named the la Fria de los guanacos and las Pavas folds, are 30 km long and are located above an inherited fault that offsets the Liassic Sañico and Piedra Pintada formations.

These observations suggest a post-Pliocene reactivation of this fault in a compressive way arguing for recent shortening in the Neuquén Basin.

### 1.1.8 (p) Analyse géomorphologique de l'activité tectonique de la ceinture de plis de Qiulitagh, piémont sud du Tian Shan, Chine

Dimitri Saint-Carlier<sup>1</sup>, Fabien Graveleau<sup>2</sup>, Bernard Delcaillau<sup>3</sup>, Jean-Emmanuel Hurtrez<sup>4</sup>, Bruno Vendeville<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

<sup>2</sup>Laboratoire Géosystèmes, Lille

<sup>3</sup>M2C, Caen

<sup>4</sup>Géosciences Montpellier

La ceinture de plis de Qiulitagh est une structure anticlinale active appartenant au bassin d'avant-pays de Kuqa (piémont Sud du Tian Shan, Chine). Sa topographie peut être divisée selon deux rides SW-NE longues de 90 km pour celle du nord et 165 km pour celle du sud. L'absence de végétation, l'homogénéité des lithologies (principalement des grès et des siltites) et la diversité des études géologiques déjà publiées en font un objet particulièrement adapté pour étudier les mécanismes de croissance des reliefs plissés à partir de leur morphologie.

Nous avons basé notre travail sur des données topographiques et des images satellites en libre d'accès (Topographie SRTM, imagerie Landsat), que nous avons traitées au moyen d'un logiciel SIG. Nous avons mené une étude morphométrique à 3 échelles d'observation : 1) l'échelle globale du pli, 2) l'échelle du bassin versant et 3) l'échelle de la vallée. L'étude des bassins versants a permis d'identifier 250 items sur lesquels 6 paramètres morphométriques sensibles à l'activité tectonique ont été analysés. Il s'agit de la pente moyenne, l'altitude moyenne normalisée, le relief local moyen, l'intégrale hypsométrique, l'asymétrie du bassin et le facteur de forme. Nos résultats montrent que la morphologie de la ceinture de plis de Qiulitagh varie significativement latéralement. Plusieurs morpho-structures semblent se développer sous le contrôle de taux de surrection variables que nous lions à un partitionnement de la déformation le long de la structure et à une évolution du plissement.

L'observation de paysages exceptionnellement réguliers passant latéralement à des paysages plus complexes permet d'étudier l'évolution dynamique de la ceinture de plis en termes de relief transitoire et d'état stationnaire. De fait, notre analyse morphométrique apporte un éclairage nouveau sur la croissance du pli de Qiulitagh en lien avec la structure de sub-surface et l'accommodation de la convergence au cours du temps.

### 1.1.9 (p) Evolution chronologique des karsts peri-méditerranéens au Messinien et au Pliocène par le couplage cosmonucléides-magnétostratigraphie-géomorphologie. Exemple en Ardèche (SE France)

Aurélien Tassy<sup>1,2</sup>, Ludovic Mocochain<sup>1</sup>, Olivier Bellier<sup>1</sup>, Régis Braucher<sup>1</sup>, Jérôme Gattacceca<sup>1</sup>, Didier Bourlès<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>ISTeP, Paris

Les gorges de l'Ardèche incisent les calcaires urgoniens intensément karstifiés du plateau de Saint-Remèze, en amont de sa confluence avec le Rhône. Certaines cavités verticales dépassent les 200 m de profondeur. Les autres grottes se présentent sous la forme de larges galeries horizontales corrélées à d'anciennes positions du niveau de base de l'Ardèche, leur donnant ainsi la même signification géomorphologique que des terrasses fluviales. Avec un développement qui atteint près de 60 km de long, la grotte de Saint-Marcel est la plus importante de ces grottes. La grotte Chauvet, également étudiée, est bien connue pour ses peintures paléolithiques. En l'absence de datation absolue, l'étagement des niveaux de grottes du plateau de Saint-Remèze a été interprété comme résultant de la crise de salinité messinienne. Afin de valider cette interprétation, des sédiments fluviaux transportés par l'Ardèche et piégés dans les grottes ont été datés de manière absolue. La méthode, basée sur la différence de décroissance radioactive des nucléides cosmogéniques produits in-situ <sup>10</sup>Be et <sup>26</sup>Al présents dans les quartz, permet une datation de l'âge d'enfouissement de ces sédiments transportés par la rivière et piégés dans les grottes et qui témoigne directement d'une phase de fonctionnement du karst. En combinant cette datation à la magnétostratigraphie, qui permet une datation relative des sédiments, ainsi qu'à la courbe d'évolution relative du niveau de l'Ardèche, cette étude a permis d'attribuer des âges de formation ou d'activité à chaque niveau de grotte. Les résultats absolus obtenus corroborent à présent le modèle d'étagement per-ascensum des grottes sous contrôle du cycle eustatique messino-pliocène. Les résultats montrent également 1/ que la dernière période d'activité de la grotte Chauvet est datée entre 2.96 et 2.18 Ma., 2/ l'âge de la surface d'abandon pliocène est compris entre 1.94 et 1.77 Ma et 3/ le plateau de Saint-Remèze s'est soulevé de 0.03mm/an depuis 1.77Ma.

### 1.1.10 (p) Les mégadolines de la chaîne côtière syrienne ; part de l'héritage structural dans la genèse de grandes dépressions karstiques

Ludovic Mocochain<sup>1,2</sup>, Christian Blanpied<sup>1</sup>, Christian Gorini<sup>3</sup>, Abdel-Karim Al-Abdala<sup>4</sup>, Aski Fawaz<sup>4</sup>, Jean-Yves Bigot<sup>5</sup>, Olivier Peyronel<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Total, Paris La Défense

<sup>2</sup>CV-Associés, Bayonne

<sup>3</sup>ISTeP, Paris

<sup>4</sup>Université Tichrine, Lattaquié, Syrie

<sup>5</sup>Association Française de Karstologie

<sup>6</sup>SGGA

La chaîne côtière syrienne est un massif calcaire s'élevant à près de 1600 m d'altitude dans le prolongement du Mont Liban. Ce massif, d'orientation nord-sud est de forme tabulaire marquée par une importante dissymétrie est-ouest. Son pendant méditerranéen, quasi structural, est en pente douce tandis qu'il est délimité à l'est par la faille du Levant, nourrissant un versant abrupt surplombant le fossé d'Al-Ghab. Si le karst du Liban est bien connu pour son potentiel spéléologique, reflétant un drainage souterrain important et bien développé, celui de la chaîne côtière est à contrario indigent. Ce différentiel est sans doute à mettre au compte de l'âge très différent des deux orogènes. D'un côté, au Liban, la surrection tectonique a débuté au Miocène, offrant ainsi un gradient topographique relativement ancien et exploité par les eaux d'infiltration depuis plusieurs millions d'années. De l'autre, en Syrie, la surrection de la chaîne côtière est plio-quaternaire, dans un contexte climatique plutôt défavorable à la karstification. Pour autant, dans la partie médiane de la chaîne, à l'est de la localité de Qardaha, le sommet des montagnes est marqué par la présence de profondes dépressions évoquant des dolines. Nous avons dénombré une quinzaine de ces dépressions dont certaines peuvent atteindre près de 300 m de profondeur. Leur position insolite, littéralement à cheval entre le versant méditerranéen et l'escarpement dominant le fossé d'Al-Ghab pose la question de leur genèse dans un contexte hydrologique défavorable, celui d'un bassin versant quasi inexistant de par sa position en crête et aggravé par la relative sécheresse du climat méditerranéen. L'analyse de ces dépressions a révélé l'existence d'une couche basaltique dans le fond de chaque cuvette ainsi que des alignements de fracture délimitant chaque bord long de ces dépressions. Par conséquent, si la dissolution des carbonates selon des modalités karstiques, reste l'agent morphologique du façonnement de ces dépressions, l'héritage structural, tant par la présence d'anciennes coulées volcaniques jouant le rôle d'écran imperméable que par la présence de failles bordières seront les principaux facteurs de genèse de ces grands vides dans cette région au climat sec.

complexes. This petrofacies changes in the coastal stretch from Bouhmed to A'mter, where drainage systems cut across the lower Sebtides Unit. Here source rock types include peridotite, granulite, gneiss and kinzigites of the Beni Bousera Massif and phyllades of the Filali Unit. The fluvial and beach sands of this area are metamorphic-ultramafic quartzolitic, and include abundant peridotite and micaschists grains. Comparison of detrital modes of fluvial and coastal marine environments highlights their dispersal pathways and drainage patterns of acutalistic sand petrofacies.

### 1.1.11 (p) Textural and compositional controls on modern beach and fluvial sands (Northern Rif Chain, Morocco)

Hajar El Talibi<sup>1</sup>, Hanane Reddad<sup>2</sup>, Said El Moussaoui<sup>1</sup>, Mohamed Najib Zaghoul<sup>1</sup>, Salvatore Critelli<sup>3</sup>, Francesco Perri<sup>3</sup>, Khadija Aboumaria<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, Maroc

<sup>2</sup>Université Sultan Moulay Sliman, Beni Mellal, Maroc

<sup>3</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università della Calabria, Italie

Spatial patterns of textural and petrological variabilities of sediments may provide constraints on the geography, climate and lithologies of sediment source areas. An understanding of the textural and petrological characteristics of modern sediments is desirable to develop more refined provenance interpretation schemes, to provide a basis for evaluating past environmental conditions, and to evaluate the role of erosion and sedimentation within the tectonic and hydrologic cycles. The main objectives of this study are (1) characterizing spatial patterns of textural and petrological variabilities, and (2) evaluating mechanisms influencing the textural and petrological components of modern river and beach sands. For these purposes, a total of 180 sediments for grain-size and modal composition analyses were collected in western Alboran Sea of the northern Rif coasts from Amsa to E'mter beaches and their related river systems. Multivariate analytical techniques were performed on the textural and petrological data. Two main sand petrofacies were identified and reflect the main clastic contribution of source rocks belonging to the Internal Domain Units. Fluvial systems draining the Ras Akaili, the Tisouka, the Dhar Nesk, and the Beni Mezala Mountains, and their related beaches constitute a metamorphic-sedimenticlastic quartzolitic sand petrofacies, derived from the epimetamorphic Ghomaride and Fédérico

## 1.2 Quantification des processus de surface

### (Quantification of Earth surface processes)

#### Responsables :

- Lucilla Benedetti (CEREGE, Aix en Provence)  
benedetti@cerege.fr
- Stéphanie Brichau (GET, Toulouse)  
stephanie.brichau@get.obs-mip.fr
- Vincent Regard (GET, Toulouse)  
vincent.regard@get.obs-mip.fr

#### Résumé :

L'étude de l'évolution des surfaces passe bien souvent par la connaissance de leur chronologie de mise en place et par la quantification de leur vitesse d'évolution. Cette session a pour but de réunir l'ensemble des études ayant pour objectif de contraindre l'évolution d'une surface à toutes les échelles spatiales et temporelles mais également la quantification des interactions entre processus de surface et tectonique et/ou climat. Celles-ci peuvent passer par la datation des morphologies, et/ou par la quantification des transferts (flux sédimentaire, taux d'érosion, vitesse d'exhumation par exemple), mais également par l'analyse de l'ensemble des processus qui déterminent la forme et l'évolution des reliefs. Nous encourageons la présentation de résultats obtenus à partir de l'observation, la mesure et la datation de la morphologie, mais également ceux traitant des processus et des lois conduisant à la mise en place des reliefs.

#### Abstract :

Understanding earth surface processes requires accurate quantification of their dynamics and chronology. This session is dedicated to all contributions aiming at constraining surface evolution at different spatial and temporal scales, as well as quantifying the interactions between surfaces processes, tectonics and/or climate. Presented studies may focus on morphochronology, and/or flux quantification (i.e., sediment fluxes, erosion or exhumation rates) and alternatively on mechanisms inducing changes in the relief.

### 1.2.1 (o) Traçage des processus d'altération par l'analyse géochimique et isotopique (U-Sr) des solutions de sol du bassin versant du Strengbach (Vosges, France)

François Chabaux<sup>1</sup>, Jonathan Prunier<sup>2</sup>, Peter Stille<sup>1</sup>, Marie-Claire Pierret<sup>1</sup>, Daniel Viville<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LHyGeS, Strasbourg  
<sup>2</sup>GET, Toulouse

Pour évaluer correctement la réponse des écosystèmes et hydrosystèmes aux modifications environnementales il est important de préciser les processus agissant dans ces systèmes. Cela passe par le développement de méthodologie pour définir ces processus. Nous proposons ici de montrer comment l'étude géochimique des principaux constituants du système eaux sols plantes combinant analyse élémentaire et isotopique (U-Sr) permet de retrouver plusieurs des processus d'altération actifs dans les niveaux superficiels des sols ; cette étude repose sur l'analyse géochimique et isotopique de solutions de sols prélevées dans deux placettes du bassin versant du Strengbach au cours des années hydrologiques 2004-2006. Nos résultats montrent la complexité des interactions eaux-roches et la variation de leur nature selon la profondeur des solutions de sol. Les résultats permettent également d'illustrer comment la comparaison des données obtenues sur un même site au cours des 10 ou 20 dernières années permet de donner une première indication de la façon dont les systèmes d'altération ont évolué au cours de ces périodes. Nos résultats suggèrent fortement que le système d'altération contrôlant les compositions chimiques des eaux du Strengbach pourrait être en évolution avec des états de modifications assez différents sous les hêtres et les épicéas de ce site.

### 1.2.2 (o) Approche quantitative de l'érosion des versants dans le Massif Central : étude comparée de la sédimentation des lacs de Guéry (1 244 m a.s.l.) et de Montcineyre (1 182 m a.s.l.)

Léo Chassiot<sup>1</sup>, Emmanuel Chapron<sup>1,2</sup>, Yannick Miras<sup>3</sup>, Anaëlle Simonneau<sup>2</sup>, Christian Di Giovanni<sup>1</sup>, Kazuyo Tachikawa<sup>4</sup>, Patrick Lajeunesse<sup>5</sup>, Edouard Bard<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans  
<sup>2</sup>GEODE, Toulouse  
<sup>3</sup>GEOLAB, Clermont-Ferrand  
<sup>4</sup>CEREGE, Aix-en-Provence  
<sup>5</sup>Centre d'études nordiques, Québec, Canada

L'érosion des surfaces continentales est un problème sociétal majeur. Sa réponse aux forçages climatiques, tectoniques et anthropiques est autorisée par l'étude des systèmes lacustres qui permettent une approche spatio-temporelle via la caractérisation des sédiments. La présente étude s'intéresse à l'évolution de l'érosion durant le dernier millénaire au sein des bassins versants des lacs de Montcineyre (1 182 m a.s.l.) et Guéry (1 244 m a.s.l.) dans le Massif Central. Elle repose sur la cartographie des remplissages lacustres par sismique réflexion à très haute résolution (14 kHz et 200 kHz), le prélèvement et l'analyse multi-proxies en laboratoire de carottages sédimentaires (spectrocolorimétrie, radiographie, mesures XRF, géochimie organique et palynologie) et enfin la datation de ces séquences par le radiocarbone.

Une quantification de la sédimentation au sein de ces systèmes a été réalisée, incluant les calculs du volume de différentes unités sédimentaires, des taux de sédimentation sur les carottages réalisés ainsi que les taux d'érosion des bassins versants. Celle-ci montre au cours du dernier

millénaire : (1) l'occurrence de dépôts instantanés résultant de mouvements gravitaires sous l'action de l'Homme et/ou de la tectonique ; (2) une évolution du contenu organique des sédiments permettant de mesurer des flux autochtones (productivité algale) et allochtones (érosion des sols) ; (3) une estimation du transfert sédimentaire depuis le bassin versant mettant en lumière des périodes historiques où l'érosion des sols était plus accrue sous l'effet anthropique des pratiques pastorales.

### 1.2.3 (o) Tectonic and topography evolution of the eastern flank of the French Central Massif

Valerio Olivetti<sup>1</sup>, Vincent Godard<sup>1</sup>, Olivier Bellier<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CEREGE, Aix-en-Provence

The geodynamic evolution of the southern France region during the last 15 Ma results from an interaction of deep and surface processes which left a diagnostic signal on the landscape/topography evolution. In this context the Massif Central is a key area to study the short- and long-term topographic response to a tectonic and climatic forcing. The Massif Central is characterized by a long-term regional uplift, which has been associated by many authors to deep processes of mantle plume rise, leading to formation of the biggest intracontinental magmatic province in Europe. Over this long-term tectonic process, a short-term event has been superimposed : the abrupt erosion/incision event triggered by Messinian base level fall, which deeply carved the regional topography. A third medium-term process occurred, such as the Miocene to present activation of strike-slip and extensional faults activity.

We will present a coupled analysis of long wave-length topography, fluvial longitudinal profiles and hillslope erosion rates from 10Be cosmogenic isotope. The integrated results have been used for investigating the different contributions leading the present day topography. While previous works pointed out the slow uplift and slow erosion process, the eastern flank of the Massif Central shows some evidences of a geomorphic rejuvenation. Our preliminary results from the shape of the river longitudinal profiles draining the eastern flank of the Massif Central as well as the wide range of cosmogenic erosion rates values indicate a landscape in a transient state in response to repeated changed base level.

### 1.2.4 (o) Taux d'incision dans le bassin versant de la Vésubie (chaînes subalpines méridionales) au cours du quaternaire récent, à partir de datations 36Cl : implications tectoniques et climatiques

Carole Petit<sup>1</sup>, Yann Rolland<sup>1</sup>, Régis Braucher<sup>2</sup>, Didier Bourlès<sup>2</sup>, Marianne Saillard<sup>1</sup>, Swan Zéathe<sup>1</sup>, Marie Revel<sup>1</sup>, Anthony Jourdon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis  
<sup>2</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

Nous avons calculé des taux d'incision récents dans un cours d'eau à partir du dosage de l'isotope cosmogénique 36Cl. Le site étudié se situe dans la basse vallée de la Vésubie, dans les chaînes subalpines méridionales. Il s'agit d'une falaise de 25m de haut localisée dans une gorge creusée par la Vésubie, un affluent du Var, dans des carbonates massifs du Jurassique supérieur. Les âges d'exposition 36Cl s'étalent entre 3 et 15 ka, soit après le dernier maximum glaciaire. Nos données suggèrent en première approximation une relation linéaire entre l'âge 36Cl et la hauteur des échantillons, ce qui donne un taux d'incision vertical moyen de 2.2 mm/an pendant les 15 derniers milliers d'années. En regardant plus en détail, le taux d'incision montre cependant deux pics

atteignant 2 mm/an et 4 à 5 mm/an vers 4-5 et 11-12 ka, respectivement, alors que les autres périodes sont caractérisées par des taux plus faibles (autour de 1 mm/an). Un chi-plot du profil longitudinal de la rivière suggère que sur le long terme, la rivière est proche d'un équilibre dynamique avec un indice de concavité de 0.475. Nous avons ensuite modélisé l'évolution du profil longitudinal de la rivière au cours des 2 derniers Ma, à partir de la loi de puissance du courant, pour différents coefficients d'érodabilité et différentes vitesses de soulèvement (entre 0.5 et 2 mm/an). Ces modèles permettent de contraindre les coefficients d'érodabilité les plus adaptés (simulant le mieux le profil longitudinal observé) pour chaque vitesse de soulèvement mais ne permettent pas de déterminer de manière univoque l'un ou l'autre de ces deux paramètres. Cependant, pour tous les taux de soulèvement inférieurs à 2 mm/an, nous montrons qu'il est nécessaire d'augmenter significativement l'érodabilité sur les 15 derniers ka (et en particulier vers 4-5 ka et 11-12 ka) pour reproduire la relation âge/altitude observée sur nos échantillons. Cela n'affecte pas, ou très peu, le profil longitudinal de la rivière et suggère que les taux d'incision récents mesurés sont dominés par un signal climatique lié aux forts changements de régime hydrique des bassins versants pendant le quaternaire récent.

### 1.2.5 (o) Surrection et incision fluviale dans le bassin de la Seine pendant le Pléistocène moyen-supérieur

Isabelle Cojan<sup>1</sup>, Pierre Voinchet<sup>2</sup>, Jean-Jacques Bahain<sup>2</sup>, Hélène Beucher<sup>1</sup>, Jacques Brulhet<sup>3</sup>, Olivier Stab<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre de Géosciences, Fontainebleau

<sup>2</sup>Département de Préhistoire du MNHN, Paris

<sup>3</sup>Andra, Châtenay-Malabry

Une nouvelle chronostratigraphie des terrasses de l'Aube et de l'Yonne s'appuie sur la corrélation des profils en long avec le système de terrasses de la Seine et sur de nouveaux âges d'ESR et des âges publiés. Au cours du dernier Million d'années le taux d'incision n'a pas été uniforme et trois périodes ont été identifiées sur cet ensemble : avant 0.8 Ma, des terrasses faiblement étagées correspondant à des taux d'incision entre 20-30 m/Ma ; entre 0.8 et 0.4 Ma, le taux d'incision a été multiplié brusquement par un facteur cinq (100 m/Ma) ; puis à partir de 0.4 Ma, il a diminué de façon plus nette dans la partie aval de la Seine (20 m/Ma) que dans son cours supérieur et le long de ses affluents (60 m/Ma).

L'augmentation du taux d'incision entre les périodes 1 et 2 est classiquement attribuée au développement des 100 cycles climatiques ka, conduisant à des processus d'érosion efficaces entretenus par les déséquilibres entre flux liquide et solide. Dans le cas de la Seine, en plus de l'influence climatique, les fluctuations du niveau marin ont certainement influencé l'évolution du profil fluvial : la période 2 est caractérisée par de bas niveaux marins (autour de -120 m) et des hauts niveaux de faible altitude (-40 m au-dessous des hauts niveaux des périodes 1 et 3). L'érosion efficace entretenue pendant les hauts niveaux marins, a alors retravaillé vers l'amont la couche alluviale déposée lors de la période froide.

Ces nouvelles données quantifiées montrent que les taux de surrection doivent être évalués dans des périodes caractérisées par des extrema eustatiques stables pour éviter les biais induits par des changements dans les profils d'équilibre.

### 1.2.6 (o) Reconstruction des flux d'érosion d'altitude durant l'Holocène dans les Alpes Occidentales françaises à partir d'archives lacustres proglaciaires (Lac Blanc Huez, Massif des Grandes Rousses)

Emmanuel Chapron<sup>1,2</sup>, Anaëlle Simonneau<sup>1</sup>, Christian Di Giovanni<sup>2</sup>, Flavio Anselmetti<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GEODE, Toulouse

<sup>2</sup>ISTO, Orléans

<sup>3</sup>Institute of Geological Sciences, Université de Bern, Suisse

Le calcul du volume et de la chronologie du remplissage sédimentaire du lac Blanc Huez situé en contexte proglaciaire à 2500 m d'altitude et en aval des moraines du Petit Age Glaciaire (PAG) permet de quantifier pour la première fois dans le détail les flux d'érosion durant l'Holocène dans les Alpes Occidentales françaises. Ce travail est basé sur la cartographie du remplissage lacustre par sismique réflexion à haute résolution (3.5 kHz), la datation d'un grand carottage (par le radiocarbone mais aussi l'identification de données archéologiques et de séismes historiques), la quantification des flux organiques d'origine strictement lacustre (production algale) et l'utilisation de SIG. L'existence d'un piège lacustre en aval des moraines du PAG permet ici de caractériser et de quantifier la dynamique sédimentaire d'un lac d'altitude proglaciaire principalement exposé aux processus d'altération et d'érosion de son bassin versant largement exposé aux précipitations hivernales associées aux vents d'Ouest et provenant de l'Atlantique Nord. L'évolution de la sédimentation lacustre terrigène permet également de préciser la dynamique glaciaire dans le bassin versant au cours de notre interglaciaire et de subdiviser celui-ci en deux grandes périodes : une disparition très marquée des glaciers durant la première partie de l'Holocène, puis la mise en place d'un Néoglaciare entre 5400 et 4700 ans cal BP, durant lequel l'activité glaciaire s'est redéveloppée et a culminé durant le PAG.

### 1.2.7 (o) Grain size effect in 10Be concentrations and derived erosion rates along the western side of the Central Andes

Sébastien Carretier<sup>1</sup>, Vincent Regard<sup>1</sup>, Riccardo Vassallo<sup>2</sup>, German Aguilar<sup>1,3,4</sup>, Joseph Martinod<sup>1</sup>, Rodrigo Riquelme<sup>5</sup>, Frédéric Christophoul<sup>1</sup>, Reynaldo Charrier<sup>6,7</sup>, Eric Gayer<sup>8</sup>, Marcelo Farías<sup>6</sup>, Laurence Audin<sup>9</sup>, Christelle Lagane<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>ISTerre, Le bourget du lac

<sup>3</sup>Departamento de Geología, Universidad de Atacama, Chili

<sup>4</sup>Advanced Mining Technology Center, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chili

<sup>5</sup>Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte Antofagasta, Chili

<sup>6</sup>Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, Chili

<sup>7</sup>Escuela de Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Andres Bello, Santiago, Chili

<sup>8</sup>IPGP, Paris

<sup>9</sup>ISTerre, Grenoble

Cosmogenic nuclides in river sediment have been used to quantify catchment-mean erosion rates. Nevertheless, variable differences in 10Be concentrations according to grain size have been reported. We analyzed these differences in eleven catchments on the western side of the Andes, covering contrasting climates and slopes. The data include eight sand (0.5-1 mm) and gravel (1-3 cm) pairs and twelve sand (0.5-1 mm)

and pebble (5-10 cm) pairs. The difference observed in three pairs can be explained by a difference in the provenance of sand and coarser sediment. The other sand-pebble pairs show a lower  $^{10}\text{Be}$  concentration in the pebbles, except for one pair that shows similar concentrations. Two sand-gravel pairs show a lower  $^{10}\text{Be}$  concentration in gravel and the other twelve pairs show a higher  $^{10}\text{Be}$  concentration in gravel. Differences in climate do not reveal a particular in difference on the  $^{10}\text{Be}$  concentration. The analysis supports a model where pebbles and gravel are mainly derived from catchment areas that are eroding at a faster rate. The twelve gravel samples with high  $^{10}\text{Be}$  concentrations probably contain gravel that were derived from the abrasion of cobbles exhumed at high elevations. In order to validate this model, further work should test if pebbles are preferentially exhumed from high erosion rate areas, and if the difference between pebbles with high  $^{10}\text{Be}$  concentrations and sand decreases when the erosion rate tends to be homogeneous within a catchment.

### 1.2.8 (o) Pediment development at high altitude in the Semiarid Andes of Chile

German Aguilar<sup>1</sup>, Maria Rodriguez<sup>2</sup>, Esteban Salazar<sup>3</sup>, Sébastien Carretier<sup>4</sup>, Katia Rossel<sup>1,2</sup>, Albert Cabre<sup>5</sup>, Rebecca Reverman<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Advanced Mining Technology Center, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chili

<sup>2</sup>Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chili

<sup>3</sup>Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chili

<sup>4</sup>GET, Toulouse

<sup>5</sup>Departamento de Geología, Universidad de Atacama, Chili

<sup>6</sup>Department of Earth and Planetary Science, University of California, Berkeley, États-Unis

In the southern limits of the Atacama Desert were recognized low relief/slope pediment surfaces in the Frontal Cordillera of the Andes Mountain. Few works are developed about these pediments; processes and timing of its development remain unknown. This work includes new geo-thermochronological and geomorphological data that constrain age and mechanism of pediplanation and his significance for understand the tectonic evolution of the Andes. Age of Apatite U-Th/He indicate a Late Oligocene - Early Miocene episode of denudation, consistent with Zircon U-Pb ages of interbedded tuff in gravels deposits resulted of this denudation. Geomorphologic observations indicate that pediments, including both, over the bedrock, and also over the top of gravel deposit, were formed after. Zircon U-Pb ages of interbedded tuffs in gravels that fill paleo-valleys indicate a late Miocene transition to incision, and constrain the pediplanation episode to early-middle Miocene time. The regional base level, located to the west near to the Pacific Ocean, has a very low altitude in relation to the current altitude of pediments. The inconsistency between altitudes cannot explain with a relative uplift of pediments respect to the regional base level, because the orogenic deformation during the Neogene time was focuses to the east in the Argentinean Andes. The data indicate that the existence of topographic barriers, together with the previous sediment's aggradation, established a local base level at high altitude, and generated the pediplanation of the landscape. This is a very important observation because pediment's locations, in relation to the regional base level, are used to constrain the magnitude and time of uplift in several works of the Andes.

### 1.2.9 Keynote communication : Contrôles climatiques et tectoniques sur la dénudation en Himalaya, apport des nucléides cosmogéniques

Vincent Godard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

La dénudation de la surface topographique dans les chaînes de montagne est soumise à l'influence conjointe du soulèvement tectonique et des précipitations. L'importance des contributions relatives de ces deux facteurs est toujours activement débattue et est centrale dans la discussion d'une éventuelle interaction entre processus tectoniques et climatiques dans les zones en déformation active. Parmi les différentes techniques disponibles pour évaluer les vitesses de dénudation les mesures de concentration en nucléides cosmogéniques dans les sédiments fluviaux actuels permettent une intégration spatiale à l'échelle d'un bassin versant et temporelle sur plusieurs milliers d'années. Il s'agit donc d'une approche idéale pour documenter les processus d'érosion à grande longueur d'onde au travers d'une chaîne de montagne.

L'Himalaya du Népal central est une zone où les vitesses de soulèvement tectonique moyen/long-terme et le régime de précipitation sont bien documentés. Nous utilisons donc cette portion de la chaîne pour tester l'influence respective de ces deux paramètres sur les taux de dénudation dérivés à partir des concentrations en  $^{10}\text{Be}$  dans une trentaine de bassins de taille moyenne.

Le long d'un transect Nord-Sud nous observons une augmentation très rapide des taux de dénudation depuis des vitesses inférieure à 0,5 mm/an dans le Bas Himalaya, jusqu'à des vitesses supérieures à 2-3 mm/an sur la flanc sud de la haute chaîne. En dépit de cette augmentation d'un facteur 5 de la dénudation, les quantités de précipitations sont comparables aux deux extrémités. Le seul paramètre qui présente une co-variation significative avec la dénudation le long du transect est le taux de soulèvement tectonique, résultant de la succession d'un plat et d'une rampe le long du Main Himalayan Thrust.

Dans ce type d'environnement en surrection active, l'ajustement de la topographie aux fluctuations climatiques est rapide, et le facteur limitant la dénudation est le gain d'énergie potentielle via la création de relief associée au soulèvement tectonique. Les variations de précipitation semblent n'avoir qu'un rôle de deuxième ordre sur la dénudation en modulant un signal qui est contrôlé au premier ordre par le soulèvement tectonique.

### 1.2.10 (o) Transient state of the Longmen Shan topography (eastern Tibetan Plateau) inferred from $^{10}\text{Be}$ derived denudation rates

Claire Ansberque<sup>1</sup>, Vincent Godard<sup>1</sup>, Olivier Bellier<sup>1</sup>, Zhikun Ren<sup>2</sup>, Xiwei Xu<sup>2</sup>, Liu-Zeng Jing<sup>2</sup>, Yong Li<sup>3</sup>, Julia De Sigoyer<sup>4</sup>, Aster Team<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>China Earthquake Administration, Institute of Geology, Beijing, Chine

<sup>3</sup>Chengdu University of Technology, Chine

<sup>4</sup>ISTerre, Grenoble

The Longmen Shan (Eastern Tibetan Plateau margin) is a good case study to investigate tectonically active continental margin erosion and to understand its steady or transient state under tectonic/climatic conditions.

We present the first transect of denudation rates across this range. We used detrital cosmogenic nuclides ( $^{10}\text{Be}$ ) concentration which has already proved its potential as a proxy for uplift patterns in mountain ranges. We sampled 33 watersheds draining the Songpan Garze flyschs from the Longriba Fault System (LF) to the front range. The results reveal a progressive denudation gradient with rates ranging from 0.03mm/yr near the LF (to the West) to  $\sim 1\text{mm/yr}$  at the front of the Longmen Shan (to the East) suggesting a broad deformation band ( $\sim 200\text{km}$ ) across the margin. The higher denudation rates is spatially

correlated to the seismic activity and higher relief. This denudation pattern brings out the role of the LF in the deformation partitioning acting as a boundary between Aba and South China blocks. Further investigations on fluvial incision allow us to emphasize the transient state of the topography inside the Min Jiang basin, flowing across the Longmen Shan.

The disequilibrium of the Longmen Shan topography could be associated with a recent relative base-level fall of the Sichuan basin but this assumption imply a fast knickpoint propagation through the Min Jiang river network because none of them have been clearly identified at the same location upon the river network. Another possibility is an upstream drainage reorganization of the Min Jiang due to the Longriba Fault System activity.

### 1.2.11 (o) Taux de raccourcissements au travers du piedmont nord du Tianshan oriental, Chine.

Dimitri Saint-Carlier<sup>1</sup>, Julien Charreau<sup>1</sup>, Jérôme Lavé<sup>1</sup>, Pierre-Henri Blard<sup>1</sup>, Stéphane Dominguez<sup>2</sup>, Jean-Philippe Avouac<sup>3</sup>, Luca Malatesta<sup>3</sup>, Shengli Wang<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier

<sup>3</sup>Tectonic Observatory (CALTECH), Pasadena, États-Unis

<sup>4</sup>Department of Earth Sciences, Nanjing University, Chine

Le Tianshan est l'une des plus importante chaîne de montagne d'Asie centrale. Si elle s'est formée à l'origine au Paléozoïque, ses structures ont été réactivées lors de la collision Inde/Eurasie et accommodent aujourd'hui une fraction importante du raccourcissement entre ces deux continents. Les données GPS de ces 3 dernières décennies montrent ainsi une vitesse de raccourcissement de 6mm/an à travers le Tianshan oriental et jusqu'à 20mm/an dans sa partie occidentale. La quantification des vitesses de déformation du Néogène au Quaternaire à travers cette chaîne apporterait donc une information cruciale concernant les mécanismes de déformation en Asie. Dans ce cadre nous nous intéressons plus particulièrement au piémont nord du Tianshan, où la déformation est distribuée le long de 3 rangées parallèles de plis et de chevauchements.

Nous proposons de quantifier les vitesses de raccourcissement de certaines structures actives de ce piémont à l'aide de deux méthodes. La première consiste, à partir de données sismiques et de mesures structurales, à quantifier le raccourcissement strate par strate en modélisant le plissement de couches syntectoniques à l'aide d'un modèle géométrique simple. Ensuite, l'histoire de la déformation et les vitesses de raccourcissement sont précisées en combinant ces raccourcissements à des datations magnétostratigraphiques des sédiments. La deuxième méthode se base sur l'analyse de la déformation de marqueurs morphologiques. Ces marqueurs (terrasses ou cônes alluviaux) seront d'abord datés par des profils cosmogéniques. Leur déformation sera ensuite quantifiée à travers l'analyse de leur topographie tout en s'appuyant sur la géométrie des structures profondes déduites des profils sismiques.

Nous présenterons ainsi plusieurs exemples sur différentes structures du piémont Nord du Tianshan. Les résultats préliminaires montrent que certaines parties du piémont subissent plusieurs millimètres de raccourcissement par an et ce depuis près de 10Ma.

### 1.2.12 (o) Des problèmes de blanchiment chez les all black où Impact et enregistrement de la dynamique de l'incision fluviale (Rangitikei, Nouvelle Zélande) sur les géochronomètres OSL, IRSL

Stéphane Bonnet<sup>1</sup>, Tony Reimann<sup>2</sup>, Dimitri Lague<sup>3</sup>, Jakob Wallinga<sup>2</sup>, Philippe Davy<sup>3</sup>, Uwe Rieser<sup>4</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Netherlands Center for Luminescence Dating, Wageningen, Pays-Bas

<sup>3</sup>Géosciences Rennes

<sup>4</sup>Luminescence Dating Laboratory School of Earth Sciences, Victoria University, Wellington, Nouvelle-Zélande

Landscape response to climate induces periods of enhanced sediment supply to rivers promoting the formation of climatic-aggradation fluvial terraces whose age and height are used for estimating mean fluvial incision rates. These rates must however be taken with caution. Numerical simulations actually suggest that incision rates are not linear between the formation of two successive terraces.

The Rangitikei River (New Zealand) is downcutting in an uplifting basement. Entrenchment is punctuated by terraces, the more recent one (T1) being classically considered to formed from 30 to 15 ka. Since abandonment of T1, the river incised 75-meter deep gorges within the bedrock. We investigated this entrenchment using optical dating (IRSL on feldspars) of 17 alluvial deposits from strath terraces cut into the bedrock. We performed measurements using Multiple Aliquots or Single Aliquot Regenerative protocols on large aliquots of fine grains of feldspars (4-11 μm) as well as measurements on single-grains on a coarser fraction (125-200 μm) of the same samples but using Post-Infrared IRSL (p-IRIR) protocol.

We show that :

- (1) abandonment of terrace T1 occurred ~10 kyr ago, more recently than previous estimates
- (2) a period of very fast incision follows the formation of T1. Incision rate then slows down ; this decrease coincides with the development of extensive post-T1 terraces. Our data support numerical findings showing that the ratio of vertical incision to lateral planation is driven largely by variations in vertical incision rate
- (3) The distribution of single-grains ages depend on the river incision rate, periods of fast incision being characterized by a larger proportion of unbleached grains in the samples. Accordingly, IRSL ages obtained using classical methods that consider measures on aliquots instead of on singles grains, all show an overestimation of ages whose magnitude depends on incision rate.

We show that ion IRLG geochronology, the proportion of mixing between bleached and unbleached grains is intimately linked to variations in the rate of bedrock erosion and related supply of unbleached grains to the river. Our study consequently suggests that the shape and width of IRSL age distributions obtained through single-grain measurements could illuminate the past dynamics of rivers.

### 1.2.13 (o) Neogene erosion of the Kerguelen Archipelago : preliminary constraints from (U-Th)/He thermochronology on plutonic rocks

Floriane Ahadi<sup>1</sup>, Guillaume Delpech<sup>1</sup>, Cécile Gautheron<sup>1</sup>, Rosella Pinna-Jamme<sup>1</sup>, Léandre Ponthus<sup>2</sup>, Damien Guillaume<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IDES, Orsay

<sup>2</sup>GET, Toulouse

The Kerguelen Archipelago (South Indian Ocean) is mostly made up of piles of Oligocene basaltic traps ( $\approx 25$  Ma) forming cliffs of about 1000m in height, which are cross cut by a dense network of large and deep valleys. The basaltic traps are intruded by numerous plutonic complexes; the largest being the plutonic complex of the Rallier du Baty peninsula in the southern western part of the main island. The Rallier du Baty plutonic complex is mainly constituted of syenites with minor occurrence of gabbros and monzonites. This plutonic complex can be divided into two plutonic complexes emplaced at different times. The southern complex was emplaced between about 15 and 7 Ma, and then the magmatic activity migrated northward to form the northern plutonic complex between 7 and 4,5 Ma. The plutonic rocks were probably emplaced at shallow depth between several hundred meters to a few kilometers.

We report the first data using the (U-Th)/He thermochronometer on apatite crystals from syenites in the southern Rallier du Baty plutonic complex in order to constrain the timing of erosion in a geological context where tectonic activity is weak and where climatic conditions have drastically changed since Oligocene. The preliminary results indicate very reproducible (U-Th)/He ages (AHe) between  $6.7 \pm 1.1$  Ma et  $4.4 \pm 0.4$  Ma. These AHe ages suggest a cooling history of the syenites that can be explained by the removal of the upper volcanic rock pile by erosion at the end of Miocene and beginning of Pliocene. The preliminary data also suggest that the exhumation is rapid and corresponds to a period where climatic conditions changed from humid and hot to cold, windy and humid at the end of Miocene-beginning of Pliocene. More AHe ages are currently under way and U/Pb and (U-Th)/He ages on zircon will be obtained, as well as barometric estimations, in order to provide better constraints on the thermal history of the plutonic complexes since their emplacement, and thus the timing of exhumation.

### 1.2.14 (o) Denudation rates on cratonic landscapes : Comparison between river load fluxes and $^{10}\text{Be}$ analysis in the Nyong and Sanaga River basins, South-Cameroon

Vincent Regard<sup>1</sup>, Jean-Loup Boeglin<sup>1</sup>, Sébastien Carretier<sup>1</sup>, Jules-Rémy Ndam Ngoupayou<sup>2</sup>, Jean-Guy Dzana<sup>3</sup>, Jean-Pierre Bedimo Bedimo<sup>4</sup>, Jean Riotte<sup>1,5</sup>, Jean-Jacques Braun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Department of Earth Science, Yaoundé, Cameroun

<sup>3</sup>Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Université de Yaoundé, Cameroun

<sup>4</sup>Centre de Recherches Hydrologiques, Yaoundé, Cameroun

<sup>5</sup>Indo-French Cell for Water Sciences, IISc- IRD Joint International Laboratory, IISc, Bangalore, Inde

<sup>6</sup>IRD-Cameroun, Yaoundé, Cameroun

A timely question is the role of large continental surface in consuming atmospheric CO<sub>2</sub>, associated with silicate weathering, soil production and physical erosion. We present here measurements of erosion fluxes in a large cratonic river basin of the humid Tropics : the Nyong river basin, South Cameroon. This catchment has been monitored at different locations along the drainage network in order to map erosion rates and fluxes in nested watersheds at a spatial scale from 1 to 20000 km<sup>2</sup>. Two additional sampling points have been studied for the more anthropogenic-disturbed basins of the Sanaga and the Mbam rivers draining the South Cameroon Plateau and West Highlands, respectively. Contemporary fluxes (discharge, total suspended solids, TSS and total dissolved solids TDS) have been derived from gauging stations for the period 2000-2011 (SO-BVET project). Millennial-scale erosion rates have been measured by analyzing cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  concentration in river sands. Both estimates are in accordance (total erosion rate of the

order of 10 mm/kyr) except for the Sanaga and Mbam river basins showing an anomalously high TSS likely due to important anthropogenic disturbances related to damming and agriculture. Along the Nyong River, the erosion (TSS) and weathering (TDS) rates are similar, ranging 2.5 to 9 mm/ky. The  $^{10}\text{Be}$  signal is integrated over more than 50 ky; hence, its resemblance with actual values indicates the late Quaternary climate fluctuations have not affected significantly the landscape behavior in southern Cameroon. The overall behavior of this catchment is consistent with a supply-limited weathering system.

### 1.2.15 (o) Tilting of continental interiors over a source of dynamic topography : Late Cretaceous erosion of the South African plateau

Jean Braun<sup>1</sup>, François Guillocheau<sup>2</sup>, Cécile Robin<sup>2</sup>, Guillaume Baby<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>Géosciences Rennes

New sedimentary flux data confirm the observation that a large pulse of erosion affected the South African Plateau in the late Cretaceous. This episode of rapid erosion (less than 30 Myr) is likely to be related to a major uplift phase that is apparently difficult to reconcile with a possible mantle origin, namely the presence of low density body in the underlying mantle causing flow and dynamical uplift of the continent. Given its size, the growth and rise of this so-called "African superswell" is likely to have taken one to several hundred million years. Here we demonstrate by using a simple model for fluvial erosion that tilting of the continent as it rides over a wide source of dynamic topography can not only cause uplift of the plateau but also lead to substantial erosion of large surface areas in a relatively short amount of time, because the tilting produces a continental-scale drainage re-organization. We show that embedding a lithological contrast, such as the one that might have existed between a thick layer of Karoo volcano-clastic sediments overlying basement, greatly amplifies the rate of erosion (and sedimentation) during the tilting episode. We demonstrate that our scenario is consistent with paleogeographic reconstructions of the position of the African continent with respect to the African superswell, the temporal and spatial evolution of kimberlite eruptions across southern Africa and the past and present-day highly asymmetrical drainage geometry.

### 1.2.16 (p) Climate Change and Shallow Landslide Evolution : Study of Gravitational Hazard within a Municipality of Bar-Sur-Loup (Alpes Maritimes, South France)

Zahida Yousaf<sup>1</sup>, Thomas Lebourg<sup>1</sup>, Damien Provitolo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> GEOAZUR, Sophia Antipolis

This study quantified shallow landslides evolution in response to climate change. Heavy rainfall, flash floods and prolonged droughts are important outcomes of climate change. Study region Bar-Sur-Loup is located SW of Alpes-Maritimes, consists of stable limestone, and unstable calcareous, Karst morphological units. These geologic formations exposed Bar-Sur-Loup (BSL) to shallow landslides hazard in response to heavy rainfall and increasing spatial risk. Our objective is to analyze extent of shallow landslide evolution exposed to extreme rainfall, causing water table rise and predicting vulnerabilities of element at risk. Slope stability was modeled by ALICE (Assessment of Landslides Induced by Climatic Events) software developed by BRGM. Input layers derived from 5m DEM and used regional lithological layer (source :

brgm) by using ArcGIS 10.1. Reviewed soil physical parameters, effective cohesion ( $c'$ ) and effective angle of internal friction ( $\phi'$ ) combined with systematic increase in water table depth within vadose zone were used to evaluate shallow landslide. Results indicated geologic instability where significant uncertainties were found for surface evolution with increased water table height from -10m to -1m. 5% increased in surface evolution when water table reaches at -3m at depth from ground surface. Shallow landslide hazard zones were then defined with rise in water table (-10m, -5m and -1m). We concluded that specific geology and rainfall events can have significant impact on slope stability due to; dissolution of underlying rocks which decreasing soil mechanical strength and increasing stress of overlying surfaces; saturation of soil increases bulk density; and Increases gravitational pull. These preparatory factors prepare slope to trigger by heavy rainfall events. We defined spatial evolution of shallow landslides posing significant risk to urban construct, high probabilities of disrupting communication system, erosion and slope failure due to high uncertainties in climatic events in BSL.

### 1.2.17 (p) Evolution morpho-tectonique de marqueurs décalés par de grands décrochements; analyse de données expérimentales et application à la Nouvelle-Zélande

Adélaïde Ferdinand<sup>1</sup>, Stéphane Dominguez<sup>2</sup>, Jacques Malavieille<sup>2</sup>,  
 Isabelle Manighetti<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier

<sup>3</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

Les marqueurs morphologiques, structuraux et sédimentaires décalés par les failles sismogènes, résultent de transformations induites à la fois par les mouvements répétés sur la faille et par l'érosion/sédimentation. Une approche classique en tectonique active est de supposer que, une fois coupés par la faille, ces marqueurs ne sont pas ou peu transformés par l'érosion. Dans cette hypothèse, la mesure de leurs décalages permet alors de restituer certains paramètres de la faille, tels que; amplitude des déplacements cumulés en surface, amplitude des déplacements co-sismiques des forts séismes passés, âges de ces forts séismes (en datant les marqueurs).

En parallèle d'une étude morpho-tectonique et géophysique menée dans le cadre du projet ANR CENTURISK sur les grands décrochements actifs de Nouvelle-Zélande, nous avons développé au laboratoire Géosciences Montpellier une approche expérimentale originale, visant à examiner l'évolution morphologique de marqueurs alluviaux et sédimentaires au cours des glissements latéraux répétés sur une faille décrochante située dans un environnement de forte érosion/sédimentation.

Les interactions tectonique - processus de surface sont étudiées à l'échelle du décrochement grâce à des modèles dans lesquels un matériau (analogue de la croûte supérieure cassante) est déformé en même temps qu'il est soumis à des processus d'érosion-transport-sédimentation. L'analyse des modèles permet la détermination et la quantification des paramètres physiques de premier ordre contrôlant les divers processus: identification des zones actives et inactives, définition des marqueurs d'intérêt, quantification des déplacements incrémentaux et cumulés à toutes les étapes d'évolution de la faille, évolution de ces déplacements au cours de l'évolution morpho-tectonique de la faille et du milieu adjacent. La dynamique des processus est analysée par corrélation d'images et interférométrie laser. Nous présenterons les résultats préliminaires de ce travail.

### 1.2.18 (p) Incision rates in the Central Pyrenees by cave sediments cosmogenic dating

Manon Genti<sup>1</sup>, Philippe Vernant<sup>1</sup>, Régis Braucher<sup>2</sup>, Jean Chéry<sup>1</sup>, Gaël Cazes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier

<sup>2</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

Rivers incision results from the interaction of vertical surface displacement (uplift, tectonic), climate forcing, and base-level lowering. Recent numerical modelling shows that erosion-induced isostatic rebound could trigger uplift and extension in low convergent mountain ranges, such as the Western Alps or the Pyrenees. Quantify valley incision is a proxy of erosion rate and can be used to constrain further models. In the Alps, the erosion rates are well documented, but in Pyrenees estimations are few and far between. Some studies estimate an erosion rate of 0.3 +/- 0.15 mm/yr. We attempt to quantify the Arbas valley incision in the Northern Central Pyrenean Zone.

This study is focused on the largest French (111 km) cave system: the Arbas massif. Cave levels record base level position. The 900 m karst vertical development analysis reveals 4 base-levels. Cosmogenic dating (10Be and 26Al) on quartz sand and pebbles abandoned in cave when the river level is lowered brings insight on the base regional geomorphic evolution between 0.2 and 5 Myr. With a geomorphology study and river profiles we discuss the quartz origin and the paleo-base-levels position. These positions applied at twelve samples gathered in several caves levels, is an important step to quantify incision rate. Currently, cosmogenic dating are in progress, we will present our results in October.

### 1.2.19 (p) Neotectonics of a slow orogenic arc inferred from quantitative geomorphology: the Jura Mountains

Mickaël Rabin<sup>1</sup>, Jean-Daniel Champagnac<sup>2</sup>, Pierre G. Valla<sup>3</sup>, Nicolas Carry<sup>1</sup>, Urs Eichenberger<sup>4</sup>, Vincent Bichet<sup>1</sup>, Jacques Mudry<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Chrono-environnement, Montbéliard

<sup>2</sup>Geologisches Institut, ETH-Zürich, Suisse

<sup>3</sup>Université de Lausanne, Suisse

<sup>4</sup>ISSKA, La Chaux-de-Fonds, Suisse

The Jura has been well studied from a structural point of view, but still remains the source of debates, especially regarding its current and recent tectonic activity. It is deemed to be always in a shortening state according to geomorphologic and stress/strain data, but geodetic studies available on the Jura involve disagreement between authors.

Quantitative morphotectonic approaches have been increasingly used since a couple of decades to infer relationships between climate and tectonics in landscape evolution. In this study, we propose to apply morphometric tools to calcareous bedrock in a slowly deformed mountain belt (Jura Mountains). In particular, we used watersheds metrics determination and associated river profiles analysis to quantify the degree and nature of the equilibrium between the long term tectonic forcing and fluvial erosion processes. We present a systematic analysis of river profiles applied to the main drainage systems of the Jura.

Our morphometric results reveal abnormal longitudinal profiles, which are controlled by tectonic and/or karst forcing. Evaluating the relative contributions of tectonics and karst influence on the destabilization of river profiles is challenging and appears still unresolved. However, we managed to isolate morphometric signals (i.e. knickpoints or prominent knickzones along the river profiles) which are correlated with major tectonic structures along the Jura arc. Results suggest recent tectonic activity along both the internal and external ranges of the Jura. This activity

seems to be located along E-W oriented structures and could correspond to folds and thrusts still recently active. However, slope destabilization, as well as rock softening due to tectonic crushing, which both occur along thrust faults can also led to disturbed river profiles. Further investigations coupling DEM analysis and detailed field observations are required to fully evaluate the tectonic imprint on the Jura landscape morphology.

### 1.2.20 (p) Relationship between the Incaic relief and the neogene erosional processes in the Semiarid Andes of Chile

Katia Rosset<sup>1,2</sup>, German Aguilar<sup>1</sup>, Luisa Pinto<sup>2</sup>, Esteban Salazar<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Advanced Mining Technology Center, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

<sup>2</sup>Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile

<sup>3</sup>Servicio Nacional de Geología y Minería - SERNAGEOMIN, Santiago, Chile

In the northern limits of the Pampean flat-slab segment was recognized gravels deposit in the high Frontal Cordillera of the Andes. Few works are developed about this gravels deposit; the basin architecture, stratigraphy and sedimentology remain unknown. This work includes new geochronological, structural and sedimentological data that constrain age, facies and provenance of gravels and his significance for understand the tectonic evolution of the Pampean flat-slab segment. Two new zircon U-Pb ages were obtained to constrain the ages of deposition of gravels ( $21.4 \pm 0.43$  -  $12.6 \pm 0.9$  Ma). The gravels deposit consists of up to ~900 m of semi-consolidated alluvial conglomerates and sandstones dips ranging between 25 and 10° to the SSE. Textures and structures in the gravels deposit indicate a braided fluvial and alluvial fans systems in a proximal environment, that showing the increase of the matrix and fine sediments to the east in relation to the coarse-conglomerate clast-supported, suggesting that energy decrease to this direction. Compositions of sediment indicate a western provenance of gravels. These observations indicate that the source of gravels is the relief located immediately to the west of the basin and the prevalence of a condition of aridity during the deposition. This relief is part of the core of the Frontal Cordillera uplifted during the Eocene - Oligocene that different authors have interpreted that was product of the Incaic Compressive Phase. Future studies of this deposit of gravel will be needed to confirm this interpretation and to correlate the spatial and temporal evolution of the gravels deposit with those that have been documented east in the Argentine foreland basins.

### 1.2.21 (p) Quantification de taux d'enfouissement au long terme de sédiments dans un contexte aride, cas du district Centinela, désert d'Atacama, Chili

Caroline Sanchez<sup>1</sup>, Vincent Regard<sup>1</sup>, Sébastien Carretier<sup>1</sup>, Gérard Héral<sup>1</sup>, Rodrigo Riquelme<sup>2</sup>, Eduardo Campos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte Antofagasta, Chili

En milieu aride, une des formes érosives majeures du relief développées sur du bedrock est le pédiment. Or les processus de pédimentation qui sont étudiés depuis longtemps, en particulier dans les milieux de

bouclier, restent mal connu notamment dû au manque de données chronologiques sur la succession des formes qui les composent. Le rôle de la pédimentation dans la réduction du relief en milieu orogénique a été négligé et la formation des pédiments a été attribuée à des processus qui se développent sur des surfaces déjà planes. Dans les Andes arides du Pérou, Chili et d'Argentine des minéralisations supergènes de cuivre, d'importance économique, sont associées aux pédiments (1).

Au vu de ce double intérêt : connaître la genèse des pédiments en milieu désertique dans un contexte orogénique et isoler les conséquences en termes métallogéniques de cette évolution, nous avons retenu une cible illustrative dans le désert d'Atacama, le district minier de Centinela. Dans le bassin El Tesoro qui est associé à un système de pédimentation, plusieurs mines cuprifères à ciel ouvert donnent accès à l'enregistrement sédimentaire d'une épaisseur d'environ 200m, depuis les 41 derniers millions d'années.

Nous proposons d'y quantifier les taux d'enfouissement et d'érosion (2) sur le long terme, grâce à une méthode combinant plusieurs nucléides cosmogéniques (10Be, 26Al et 21Ne) pour mettre en relation les époques de minéralisation cuprifères et les vitesses d'évolution du relief.

Ces résultats seront complétés par des études relatives aux variations climatiques de ce bassin, isotopie stable C, H (3), analyses DRX, descriptions pédologiques, afin de mieux cerner le rôle du climat dans la pédimentation dans ce type de contexte.

1. Sillitoe R, Supergene Oxidized and Enriched Porphyry Copper and related Deposits. Economic Geology 100th Anniversary Volume, 723-768. (2005).

2. Davis, M., Matmon, A., Placzek, C. J., McIntosh, W., Rood, D. H., & Quade, J. Cosmogenic nuclides in buried sediments from the hyper-arid Atacama Desert, Chile. Quaternary Geochronology, 19, 117-126. (2014)

3. Tapia, M., Riquelme, R., Marquardt, C., Mpodozis, C., Mora, R. Estratigrafía y sedimentología de la Cuenca El Tesoro, Distrito Centinela (región de Antofagasta) y su relación con la mineralización exótica de cobre. En XIII Congreso Geológico Chileno, Antofagasta (2012)

### 1.2.22 (p) On the potential of fluvial seismology and acoustic for bedload transport monitoring in small gravel-bed rivers

Julien Barrière<sup>1,2</sup>, Adrien Oth<sup>2</sup>, Andreas Krein<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National Museum of Natural History of Luxembourg, Luxembourg

<sup>2</sup>European Center for Geodynamics and Seismology, Luxembourg

<sup>3</sup>Centre de Recherche Public - Gabriel Lippmann, Luxembourg

The bedload transport is an essential process for the scouring and sediments depositions of alluvial channels, but it is difficult to observe and quantify and traditional techniques are generally insufficient. Bedload surrogate monitoring based on seismological observations have been envisaged in the last years. This so-called « fluvial seismology » has been developed in the context of sediments transport in mountain rivers or debris flows. We propose here to study less energetic streams flowing in the low mountain range to investigate the seismic detection threshold of sediments motion. A hydrodynamic signature was successfully detected during a flood event but further investigations are needed to better understand the source of river-induced seismic noise. This seismic approach is now complemented by hydroacoustic measurements of the sediments motion which should be very useful to constraint the potential bedload-related seismic measurements.

Our hydroacoustic set-up is constituted by a piezoelectric hydrophone acting as a « sediment vibration sensor » in contact with a steel plate located on the streambed. With such apparatus, the signal processing is generally reduced to total power calculation or impact counting to estimate

the amount of transport after calibration with previously collected sediments. Another important aim of our study is to improve the processing procedure in order to derive more information on time-varying bedload properties. According to the Hertz contact theory and acoustic emission method literature, the grain size could be estimated by analysing the signal waveform. When a grain impacts the plate, the amplitude and the frequency are the two fundamental wave properties related to the size of the particle. Based on an advanced signal decomposition technique, we show through laboratory (flume experiments) and field results that the two attributes aforementioned are valuable criteria to differentiate many grain size classes.

### 1.2.23 (p) Lien entre dépôt sédimentaire et hydrologie dans la Dordogne tidale

Sabine Schmidt<sup>1</sup>, Ana Fuentes Cid<sup>1</sup>, Georges Oggian<sup>1</sup>, Eric De-Oliveira<sup>2</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Pessac

<sup>2</sup>Laboratoire National d'Hydraulique et d'Environnement, EDF Recherche et Développement, Chatou

Couvrant une superficie de 635 km<sup>2</sup>, l'estuaire de Gironde, commun à la Garonne et à la Dordogne, est le plus vaste estuaire de l'Europe occidentale. Il est caractérisé par une zone de turbidité maximum (ZTM), avec des concentrations en matières en suspension > 1 g L<sup>-1</sup>, dont la position évolue au cours des saisons, avec un effet de chasse lors des grandes crues. Ces fortes concentrations particulières ont un effet direct localement (envasement) et vers les régions côtières avec la dispersion d'un panache turbide. La position, l'étendue et la concentration de la ZTM évoluent au rythme des marées et de la force des apports fluviaux. Or il est maintenant établi que le nombre de jours d'étiage de la Garonne et de la Dordogne s'est allongé progressivement depuis une trentaine d'années, augmentant la durée du stationnement du bouchon vaseux en amont. Cette évolution est supposée déplacer les zones d'envasement vers les sections fluviales de la Gironde, dont la sédimentation est peu connue.

Dans ce travail, nous présentons une étude du dépôt récent dans la Dordogne tidale, basée sur une série de 8 carottes prélevées dans le lit mineur en novembre 2012, à la fin d'un étiage assez marqué, alors que la ZTM était encore bien présente dans l'estuaire amont. La radiographie d'une carotte de 137 cm révèle notamment une succession de lamines, surmontées d'une couche (10 cm) de sédiments fins peu consolidés et récents d'après leur signature en <sup>7</sup>Be (T<sub>1/2</sub> = 53 jours). L'ensemble des résultats (porosité, granulométrie, <sup>210</sup>Pb, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th) seront discutés en termes de chronologie du dépôt et de traçage des sédiments (fluviaux, TMZ). Nous discuterons si une telle approche peut permettre de mettre en évidence des changements dans la sédimentation de la section tidale de l'estuaire de la Gironde en lien avec la diminution des apports fluviaux.

### **1.3 Morphodynamique des zones littorales – architectures, dynamiques aux échelles de temps longues, résilience et effets anthropiques**

**(Morphodynamics of coastal areas – architecture, long scale dynamics, resilience and anthropic effects)**

#### **Responsables :**

- Vincent Regard (GET, Toulouse)  
vincent.regard@get.obs-mip.fr
- Anne Duperret (LOMC Université Le Havre et LDO Plouzané)  
anne.duperret@univ-lehavre.fr
- Frédéric Bouchette (Géosciences Montpellier)  
frederic.bouchette@gm.univ-montp2.fr

#### **Résumé :**

Cette session vise à regrouper des contributions originales relatives à la géomorphologie et la morphodynamique des littoraux sableux ou rocheux, des estuaires et des systèmes lagunaires. Cette session couvre les enregistrements sédimentaires et les processus s'exprimant aux échelles de temps annuelle à historique, et sert de prolongement à la session 2.6 axée sur une dynamique littorale à plus court-terme. La session 1.3 accueillera aussi les travaux aux échelles de temps très long, notamment ceux portant sur l'édification et la préservation des prismes littoraux Holocène. Les contributions attendues sont largement multidisciplinaires : modélisation physique et numérique, géologie de terrain, géologie marine, carottages, géochronologie, imagerie et mesure géophysique de [sub-]surface à haute-définition, imagerie spatiale à grande échelle... Les travaux inter-disciplinaires sont encouragés jusqu'à l'intégration des aspects développés en sciences humaines et sociales sur la vulnérabilité et la résilience des littoraux.

### 1.3.1 (o) Decadal to instantaneous morphodynamics of a sand barrier driven by typhoons forcings : Wan-Tzu-Liao (south-westernmost Taiwan)

Lucie Campmas<sup>1</sup>, Frédéric Bouchette<sup>1</sup>, Samuel Meule<sup>2</sup>, Damien Sous<sup>3</sup>, Francois Sabatier<sup>2</sup>, Jiing-Yih Liou<sup>4</sup>, Lise Petitjean<sup>1,3</sup>, Romain Le Roux-Mallouf<sup>1</sup>, Hwung-Hweng Hwung<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier

<sup>2</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>3</sup>MIO, Marseille

<sup>4</sup>National Cheng Kung University, Taiwan, Chine

Morphodynamics of a sand barrier is already well-understood in the literature when it forced by moderate storms but not as well-documented under extreme storms. From the decadal to the instantaneous scales, this study focus on the sand barrier morphodynamics driven by typhoons.

The long-term shoreline changes (1993-2009) of the sand barrier is based on aerial photographs and satellites images. Seven months of monitoring (2011-2012) including typhoon events and typhoons/monsoon seasons providing 20 topographic surveys of a barrier part (from the subtidal zone to the back-barrier). Concomitantly, dataset provided by the Cigu offshore wave buoy, a current profiler deployed in the near-shore area and a network of pressure sensors spread along a cross-section from the lower subtidal zone to the dune are processed to relate hydrodynamic forcings to morphological responses.

The shoreline changes evidence cross-shore processes in the north part of the barrier (41 m/yr) and a strong losses of barrier area since 2004 (-1154 km<sup>3</sup>). Over the year, the sand barrier recorded 18.5 m of retreat with 1439 m<sup>3</sup> of sand loss. Although winter are erosive season (-4995 m<sup>3</sup>), the summer results in an accretion period (+3556 m<sup>3</sup>) with a foreshore nourishment and a shoreline seaward shift. Typhoon TALIM is the most energetic event (offshore significant wave height up to 10.3 m) and representative event observed of this seasonal pattern. Morphological changes included 6.7 m of dunefoot retreat and a sand transfer from a dune breach to wash-over deposits in the lagoon. Additionally, the foreshore was nourished (+1761 m<sup>3</sup>) as well as the whole sand barrier (+2310 m<sup>3</sup>). This strong beach front supplying occurs predominantly under the swash zone and mostly during the rising stage of the storm. The on-going analysis focuses on the role played by individual swash events on sand bed dynamics.

### 1.3.2 (o) Long and short terms evolution of a deep open shelf tidal ridge from swath bathymetry and seismic sparker investigations : the example of « Banc du Four » (Western Brittany, France)

Marcaurelio Franzetti<sup>1</sup>, Pascal Le Roy<sup>1</sup>, Christophe Delacourt<sup>1</sup>, Thierry Garlan<sup>2</sup>, David Graindorge<sup>1</sup>, Christophe Prunier<sup>1</sup>, Alexey Sukhovich<sup>1</sup>, Romain Cancouet<sup>1</sup>, Anne Deschamps<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LDO, Plouzané

<sup>2</sup>SHOM, Brest

Ridges (or sand banks) are the most significant bedforms of tidal-dominated continental shelves. Their progradation rates are usually slow (< 1m yr<sup>-1</sup>), especially in a deep continental shelf environment. More over, if most of superficial morphologies of ridges appear in equilibrium with present-day hydrodynamic regime, the time-scales of processes responsible for their formation and evolution are of the same order as the duration of a high frequency sea-level cycle. It implies that last post-glacial sea-level rise is one of the main controlling factors of ridge development. Nevertheless, despite the numerous reported examples, their

growth mechanisms still remain in debate and constitute a long-standing scientific challenge. As a consequence of long and short terms combined processes involved in tidal ridges development, the understanding of ridges morphodynamics needs to characterize both external and internal architectures. This motivated the realisation of coupled seismic and swath bathymetric surveys conducted across the sand ridge system of the Banc du Four located on the starved continental shelf of the western Brittany. This system is about 45m thick, settled by depths of 70 to 105 m L.A.T. It is composed of a mosaic of sand bank and about 500 dunes. Some of the dunes' wavelengths and heights exceed 1000m and 30m respectively placing them among the largest dunes ever described. Relatively high migration velocities on deep continental shelves (from 3 to 20m.yr<sup>-1</sup>) attest of their still present dynamical equilibrium. Interpretation of the seismic reflection data allow to individualize five seismic within the bank and separated by pronounced regional-scale erosional unconformities. Their geometries allowed to reconstruct long-term evolution of the ridge and the establishment of progressive connections between stepped submarine channels and tidal dynamics during the last sea-level rise.

### 1.3.3 (o) Dynamique couplée zone de surf - zone de swash - nappe de plage : étude in-situ sur la plage de Porsmilin

Lise Petitjean<sup>1,2</sup>, Frédéric Bouchette<sup>1</sup>, Damien Sous<sup>3</sup>, France Floch<sup>h4</sup>, Nicolas Le Dantec<sup>4,5</sup>, Hugo Humbert<sup>1</sup>, Anne Deschamps<sup>4</sup>, Vincent Rey<sup>2</sup>, Christophe Delacourt<sup>4</sup>, Christophe Prunier<sup>4</sup>, Klervi Hamon<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier

<sup>2</sup>MIO, Marseille

<sup>3</sup>MIO, La Garde

<sup>4</sup>IUEM, Plouzané

<sup>5</sup>CEREMA, Margny-Lès-Compiègne

Cette communication s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche sur la dynamique de la frange littorale visant à observer et analyser les processus physiques fondamentaux contrôlant l'hydrodynamique et la morphodynamique des plages sableuses. Le but est de contribuer à la compréhension du couplage hydrodynamique entre les ondes de surface, les variations du niveau d'eau sur la plage et la dynamique de la nappe phréatique au sein de la plage sableuse et des interactions entre hydro- et morphodynamique. L'approche retenue est essentiellement expérimentale in-situ. Elle est basée sur l'analyse de bases de données existantes (ANR KUNSHEN), et sur l'acquisition de données nouvelles à l'occasion de campagnes courtes (quelques semaines) sur le terrain notamment dans le cadre du projet d'observatoire ESPIGOBS.

Le jeu de données étudié ici est celui issu d'une campagne de mesure effectuée cet hiver (du 31 janvier au 12 février 2014) sur la plage de Porsmilin, plage de poche située à proximité de Brest dans l'anse de Bertheaume (Mer d'Iroise, Bretagne occidentale). L'instrumentation se concentre sur un profil cross-shore comprenant 10 capteurs de pressions (zone de battement de marée) pour la mesure de l'hydrodynamique des zones de surf et de swash et des fluctuations du sommet de la nappe, ainsi qu'un ADCP (à 1km au large de la plage) pour les caractéristiques des vagues incidentes. La bouée des Pierres Noires est également utilisée pour connaître le forçage au large. Le dispositif a essuyé plusieurs coups de vent (les 1er, 5 et 8 février) induisant des conditions hydrodynamiques très énergétiques. La morphologie de la plage est très changeante au cours de la campagne, avec le transport important de sédiment vers le large, l'apparition d'une barre de galets en haut de plage et de tourbes holocènes en haut et bas de plage. Notre analyse se concentre sur les couplages entre niveaux d'eau, transformation des vagues incidentes et évolutions morphologiques.

### 1.3.4 (o) Contribution sur l'architecture du cordon de galets de la pointe du Hourdel et son évolution temporelle (Baie de Somme, 80)

Martin Livet<sup>1</sup>, Josselin Roué<sup>1</sup>, Olivier Bain<sup>1</sup>, Pascale Lutz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais

Cette étude porte sur l'évolution et l'architecture de la cellule hydro-sédimentaire de la pointe du Hourdel. Ce travail a été réalisé dans le cadre du Mémoire d'Initiation à la Recherche, de la formation en géologie de l'Institut Polytechnique LaSalle Beauvais. La zone d'étude correspond à la partie septentrionale d'un cordon de galets, long de seize kilomètres. Ce cordon est situé entre la ville d'Ault et le Hourdel ; il sépare ainsi la Manche de l'ensemble des Bas-Champs, situés sous le niveau de la mer. L'objectif principal de ce travail est de caractériser la partie terminale de cette cellule hydro-sédimentaire, longue de neuf cents mètres. Pour ce faire deux campagnes de relevé topographique ont été réalisées en septembre 2011 puis en février 2012. Lors de la première mission de terrain, mille neuf cent quatre-vingts points de mesure topographique ont permis le nivellement de l'enveloppe supérieure du poulcier avant la période hivernale. De plus, une campagne géophysique réalisée à l'aide d'un géoradar muni d'une antenne blindée de 500Hz a permis d'imager les structures internes du cordon, sur une longueur cumulée de mille cinq cent mètres. L'interprétation de cinq profils radar d'une longueur moyenne de cinquante mètres a permis de mettre en évidence différentes structures sédimentaires tels que des litages obliques progradant vers le Nord et l'Est, des surfaces d'érosions et des chenaux tidaux. La deuxième campagne de terrain a permis l'acquisition de mille quatre cent cinquante points de nivellement. L'intégration, sur le logiciel ArcGis, des données topographiques des deux campagnes a permis de caractériser les zones en érosions et en accrétions spécifiques aux périodes de tempête. De plus une progradation de vingt-deux mètres vers l'Est a aussi été mise en évidence.

### 1.3.5 (o) Evolution morphodynamique plurianuelle des falaises littorales de la pointe de Caux (Haute-Normandie)

Sylvain Elineau<sup>1,2</sup>, Anne Duperré<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>LOMC, Université du Havre

<sup>2</sup>GMGL, Vannes

<sup>3</sup>IUEM, Plouzané

A l'échelle de la Côte d'Albâtre (Haute-Normandie), la pointe de Caux est formée de falaises (90m de haut) constituées d'une embase argilo-sableuse surmontée par de la craie. Ce linéaire côtier s'étend sur environ 20km de long et présente un talus d'éboulis pérenne et continu, dont le volume total est estimé à 36,7 millions de m<sup>3</sup>.

Récemment, le glissement du Fond du Val (Février 2013) et l'effondrement de Saint-Jouin-Bruneval (Juillet 2013) ont mis en évidence une dynamique gravitaire active et événementielle sur ce secteur côtier. Cependant, les reports d'événements gravitaires historiques couplés à des relevés Lidar aérien indiquent un gradient d'intensité nord-sud de l'activité gravitaire (type de glissements, volumes impliqués), en liaison avec les formations lithologiques constituant la falaise.

Sur la période 1985-2008, le recul moyen du sommet de falaise est estimé à 18 cm/an tandis que le pied de falaise (talus d'éboulis) avance ou recule en fonction du type de mouvement gravitaire. Les taux de recul actuel couplés au volume de talus accumulés laissent à penser que le talus s'est formé sur plusieurs centaines d'années, témoignant d'une dynamique jeune et active.

La présence d'un talus d'éboulis et d'un cordon de galets en pied de falaise limite les actions marines en pied de falaise. Seul 10% du linéaire

côtier est atteint par les hautes mers de vives-eaux. Cependant, les relevés haute-résolution LiDAR montrent des reculs ponctuels de pied de talus pouvant atteindre 1m/an entre 2008 et 2011, bien au-delà des taux d'érosion moyens du sommet de falaise. Ces érosions ponctuelles d'origine marine sont suspectées de localiser les futurs mouvements de terrain affectant l'ensemble de falaise, par diminution de l'effet de butte de pied.

L'étude spatio-temporelle des événements gravitaires historiques et actuels montre une évolution différentielle de l'ensemble de la côte contrôlée par la lithologie des falaises et modulée par les agents météo-marins.

### 1.3.6 (o) La plateforme littorale de la pointe de Penmarc'h (Sud Finistère) : impact de la tectonique sur son évolution morphologique à long terme.

Céline Raimbault<sup>1</sup>, Anne Duperré<sup>1</sup>, Bernard Le Gall<sup>2</sup>, Christine Authemayou<sup>2</sup>, Brigitte Van Vliet-Lanoë<sup>2</sup>, Stéphane Molliex<sup>2</sup>, Vincent Regard<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LOMC, Le Havre

<sup>2</sup>LDO, Plouzané

<sup>3</sup>GET, Toulouse

Un MNT Terre-Mer haute-résolution (< 1 m) de la zone littorale du sud-Finistère centré sur la pointe rocheuse de Penmarc'h a été réalisé grâce à la fusion de différentes données : LiDAR terrestre et bathymétrique (projet Litto3D SHOM, IGN, IFREMER) couplés à du sonar interférométrique (campagne CROCOLIT). Cette cartographie permet l'imagerie de la plateforme littorale actuelle, qui se présente comme une surface sub-horizontale de grande extension (max 5 km de large), limitée en mer par un escarpement de 40 m.

La côte rocheuse de Penmarc'h est constituée par un granite hercynien à relief émoussé (topographie max de 70m au centre du Pays Bigouden), dont l'altitude devient très faible (de 0 à 30m) au sud de la péninsule. La côte est bordée au nord par un escarpement de 10m de haut, continu et sinueux orienté globalement NW-SE. Cet escarpement est interprété comme un paléo-trait de côte, délimitant une large paléo-plateforme marine altérée de 7 km de large. L'ensemble de la paléo-plateforme est inclinée vers le SE de 0.05° indiquant un basculement tectonique responsable de son immersion partielle et dont la signification régionale est à discuter. L'analyse de la fracturation met en évidence deux directions structurales préférentielles (NE-SW et NNW-SSE) dont certaines localisent l'érosion, ainsi que deux zones structurales de part et d'autre d'une faille orientée NNW-SSE. Cette structure probablement hercynienne se parallélise en amont avec l'escarpement suggérant un contrôle structural partiel du paléo-trait de côte.

Ainsi, l'héritage structural et la tectonique à grande longueur d'onde semblent en partie expliquer la morphologie de la plateforme littorale de la Pointe de Penmarc'h. La chronologie des événements reste toutefois à être précisée. Une étude par nucléides cosmogéniques <sup>10</sup>Be permettra de déterminer les conditions de réoccupation de la paléo-plateforme au cours des derniers stades interglaciaires.

### 1.3.7 (p) Dynamics of the turbidity maximum zone in the tidal rivers of the Gironde estuary : 9 years of continuous in situ monitoring

Isabel Jalón Rojas<sup>1</sup>, Sabine Schmidt<sup>1</sup>, Aldo Sottolichio<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Talence

One of the largest European estuaries, the fluvial-estuarine system of the Gironde, presents a pronounced Turbidity Maximum Zone (TMZ) characterized by high suspended sediment concentrations. Freshwater inflow and tidal cycles induce the temporal variations of the size, position and concentration of the TMZ. The upper Gironde estuary consists of two narrow tidal rivers (Garonne and Dordogne), where the TMZ dynamics are particularly sensitive to changes on river flow. Up to recently, the upper reaches were still poorly documented. Understanding and predicting the TMZ dynamics is crucial for a better evaluation of the estuarine morphology and water quality. Since 2004, a real-time continuous system records turbidity at representative stations of the fluvial (Bordeaux and Portets on the Garonne River ; Libourne on the Dordogne River), aims to establish a long-term reference database. In this work, we present 9-years of records of turbidity for analysis and discussion of the TMZ dynamics in the tidal rivers of the Gironde estuary especially at seasonal and long term scales.

Tidal rivers present marked seasonal differences in turbidity : from about 10 NTU in a wet season to nearly 9999 NTU in a dry season. The value range of river flow that promotes the TMZ installation is defined at all stations. We found a pronounced interannual variability in the concentration and persistence of the TMZ according to hydrological conditions. In the Garonne River, the TMZ is present for 93 days and 250 days, during a wet and dry year, respectively. The turbidity evolution according to the river flow shows counterclockwise and clockwise hysteresis patterns at different temporal scales : over flood events, over the spring-neap tide cycles, and over the transitional period between the installation and expulsion of TMZ. These hysteresis patterns may reveal the location of the transported sediment sources, and allow evaluate the presence of remained mud with the consequent changes in morphology.

### 1.3.8 (p) Le projet TANDEM (Tsunamis en Atlantique et MaNche : Définition des Effets par Modélisation) (2014-2017) : enjeux pour les vulnérabilités littorales aux tsunamis

Hélène Hébert<sup>1</sup>, Stéphane Abadie<sup>2</sup>, Michel Benoit<sup>3,4</sup>, Ronan Créach<sup>5</sup>, Claire-Marie Duluc<sup>6</sup>, Audrey Gailler<sup>1</sup>, Sébastien Garziglia<sup>7</sup>, Anne Lemoine<sup>7</sup>, Anne Loevenbruck<sup>1</sup>, Olivier Macary<sup>1</sup>, Aurélie Maspataud<sup>5</sup>, Richard Marcer<sup>8</sup>, Denis Morichon<sup>2</sup>, Rodrigo Pedreros<sup>7</sup>, Vincent Rebour<sup>6</sup>, Mario Ricchiuto<sup>9</sup>, Ricardo Silva Jacinto<sup>10</sup>, Monique Terrier<sup>7</sup>, Samuel Toucanne<sup>10</sup>, Paola Traversa<sup>11</sup>, Damien Violeau<sup>4</sup>, Yutaka Hayashi<sup>12</sup>

<sup>1</sup>DASE/LDG, CEA, Bruyère le Châtel

<sup>2</sup>SIAME, Pau

<sup>3</sup>ENPC, Chatou

<sup>4</sup>EDF R&D, Chatou

<sup>5</sup>SHOM, Brest

<sup>6</sup>IRSN, Fontenay-aux-Roses

<sup>7</sup>BRGM, Orléans

<sup>8</sup>Principia, La Ciotat

<sup>9</sup>INRIA, Talence

<sup>10</sup>IFREMER, Plouzané

<sup>11</sup>EDF CEIDRE, Aix en Provence

<sup>12</sup>MRI, Nagamine, Tsukuba 305-0052, Japon

TANDEM (Tsunamis en Atlantique et MaNche : Définition des Effets par Modélisation) est financé dans le cadre des projets d'Investissements d'Avenir (« Recherche en matière de Sécurité Nucléaire et Radioprotection »). Le projet vise à estimer les effets des tsunamis, pour les côtes françaises, et particulièrement sur l' Atlantique et la Manche, où les installations nucléaires civiles sont installées depuis environ 30 ans. TANDEM vise notamment à tirer des conclusions de la catastrophe japonaise

de 2011, afin de définir, adapter et vérifier les codes numériques de modélisation des tsunamis par rapport à la base de données exceptionnelles du tsunami de 2011. Ces méthodes validées sont applicables pour définir aussi précisément que possible le risque tsunami sur les côtes Atlantique et Manche, et les périodes de retour associées.

L'aléa sismique modéré dans cette région peut difficilement déclencher des tsunamis majeurs. Mais certains séismes peuvent se produire sous la mer (pas de Calais, Vendée...), et aucune estimation des risques tsunami dus à de telles sources n'a été réalisée à ce jour pour les côtes concernées. Des sources de type gravitaire, plus délicates à caractériser, peuvent aussi être envisagées, avec de longues périodes de retour.

TANDEM s'articule autour de 4 WP principaux pour : WP1 - adapter et améliorer les outils de simulation numérique des tsunamis, WP2 - tester ces méthodes pour mieux appréhender le rôle des incertitudes (source, propagation, ou de l'impact côtier), WP3 - étudier avec ces méthodes le tsunami de 2011 de Tohoku, notamment la variabilité des effets sur les infrastructures côtières, WP4 - appliquer ces méthodes pour la zone d'étude française, comprenant la recherche de documents historiques, la définition de sources tsunamigéniques possibles (gravitaires, sur les marges de Gascogne et Armorique notamment, et sismiques, tel que le séisme de Lisbonne de 1755), et la modélisation des effets côtiers à l'échelle régionale et locale.

## 1.4 Paléoaltérations et paléoenvironnements

### Responsables :

- Robert Wyns (BRGM, Orléans)  
r.wyns@brgm.fr
- Dominique Chardon (GET, Toulouse)  
dominique.chardon@get.obs-mip.fr

### Résumé :

Depuis une vingtaine d'années, les progrès dans les méthodes de datation des profils latéritiques et le traçage de la trajectoire des continents par paléomagnétisme ont permis de montrer que de nombreux profils latéritiques se sont développés dans le monde très en dehors de la ceinture intertropicale, jusqu'à de hautes latitudes (50 à 60°). Les âges obtenus montrent que nombreux profils d'altération d'Afrique de l'Ouest, d'Amérique du Sud ou d'Australie sont contemporains de ceux présents actuellement en Europe et développés sous des paléolatitudes comprises entre 35 et 50°. Le développement des profils latéritiques, ou plus généralement des profils d'altération soustractive caractérisés par le lessivage de la roche parente apparaît systématiquement associé à des bombements des lithosphères continentales d'origine tectonique (épaulements de rifts, flambage en compression, points chauds). Ces données permettent de relativiser le rôle du climat dans le développement et la répartition mondiale des profils d'altération.

Cette session sera l'occasion de faire le point sur la connaissance et la répartition des paléoaltérations latéritiques dans le monde et de leurs âges, et de discuter du rôle respectif de la tectonique et du climat dans la genèse des différents types d'altération.

### Mots clefs :

altération, climat, datation, paléomagnétisme, déformations lithosphériques, traces de fission, paléosurfaces, paléoclimats.

### 1.4.1 *Keynote communication* : Le Massif du Hoggar (Sahara, Algérie) : un domaine en surrection depuis 40 Ma - conséquences sur la dynamique du manteau

François Guillocheau<sup>1</sup>, working group TopoAfrica

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

Le Hoggar est un massif montagneux d'une altitude moyenne supérieure à 900 m qui atteint 2900 m (Mont Tahat). Il est situé au milieu du Sahara grande étendue plate, d'altitude moyenne comprise entre 200 et 300 m. L'âge de ce relief et les mécanismes contrôlant sa surrection sont discutés, entre deux scénarios extrêmes : des reliefs pérennes depuis la fin du Paléozoïque ou des reliefs « récents » néogènes.

Pour résoudre cette question, nous avons réalisé une étude géomorphologique focalisée sur les différentes générations de surfaces d'aplanissements et plus particulièrement l'association pédiplaines - pédiments. Ces différentes surfaces d'aplanissements étagées ont pu être datées selon leurs relations géométriques avec le volcanisme et les sédiments.

Trois grands groupes de surfaces ont été cartographiés :

- les surfaces sommitales de l'Atakor et du Tefedest, dégradation en deux temps d'une importante surface latéritique,
- les surfaces associées à la pédiplaine fossile de l'Amador, délimitées en amont par un important escarpement,
- les surfaces basses connectées aux niveaux de base relatifs de la plaine de l'Amguid (Méditerranée) et de plaine de Tin Tarabine (Niger - Océan Atlantique).

La surface latéritique de l'Atakor et du Tefedest correspond vraisemblablement à la surface bauxitique d'Afrique de l'Ouest (Beauvais et Chardon, 2013) d'âge Paléocène terminal - Eocène moyen. Sa première dégradation intervient aux alentours de la limite Eocène-Oligocène. La surface de l'Amador est polygénique avec un premier façonnement dès la limite Eocène Oligocène se poursuivant jusqu'au Miocène moyen. Les surfaces basses sont récentes, plus jeunes que 3 Ma.

La surrection du Hoggar actuel s'initie donc dès l'Eocène supérieur et le processus est toujours actif. C'est un bombement d'au moins 1000 km de longueur d'onde que seul un mécanisme mantellique peut expliquer.

### 1.4.2 (o) Le Massif armoricain : un relief deux fois enfoui puis exhumé en réponse aux mouvements relatifs Ibérie-Eurasie (Crétacé inférieur ? Paléogène)

Paul Bessin<sup>1</sup>, François Guillocheau<sup>1</sup>, Cécile Robin<sup>1</sup>, Jean-Michel Schroëtter<sup>2</sup>, Hugues Bauer<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Rennes

<sup>2</sup> BRGM, Rennes

<sup>3</sup> BRGM, Orléans

Le Massif armoricain est un domaine de socle, principalement varisque, dont l'âge d'exhumation est controversé, à l'image de nombreux domaines de socle européens : ce massif est-il (i) un relief résultant de l'aplanissement de la chaîne varisque ou (ii) un relief enfoui puis exhumé au cours de l'ouverture de l'Atlantique Nord (Golfe de Gascogne) au Crétacé inférieur et/ou durant la convergence Afrique-Eurasie au Paléogène ?

Nous avons réalisé une étude géomorphologique (analyse de MNT et contrôles terrain) des formes du relief du massif. La datation de ces formes est basée sur leur relation géométrique avec les profils d'altération et les sédiments préservés datés. Les résultats obtenus permettent de proposer un modèle d'évolution géologique et géomorphologique du Massif armoricain au cours du Méso-Cénozoïque et soulignent les

points suivants :

- (1) Ce massif préserve des surfaces d'aplanissement anciennes, d'âge Trias (?) à Crétacé inférieur successivement enfouies sous des plates-formes carbonatées du Jurassique puis du Crétacé supérieur (Craie).
- (2) Ces surfaces d'aplanissement ont été exhumées au cours de deux périodes, (i) au Crétacé inférieur en réponse à l'ouverture du Golfe de Gascogne et (ii) au Crétacé terminal-Paléocène en lien avec la convergence Ibérie-Eurasie.
- (3) La surface d'aplanissement majeure résulte de l'érosion chimique (latérites) et physique contemporaine d'une surrection liée à l'ouverture du Golfe de Gascogne. Cette surface est ensuite déformée (flambage ?) et reprise au Crétacé terminal-Paléocène (polygénique).
- (4) Au Paléogène, une dernière génération de pédiments est formée puis ennoyée durant la transgression du Miocène moyen. (5) Le relief armoricain est enfin incisé par les rivières, (i) au Miocène supérieur-Pliocène (système *ri* Sables rouges *z*) et (ii) à la limite Pléistocène moyen-Pléistocène inférieur, début de l'incision des vallées actuelles liée à une surrection (convergence Apulie-Eurasie) et un changement climatique (précipitations).

### 1.4.3 (o) Weathered paleosurface in central Pyrenees : reconstructing their topography and extent at depth

Bernard Monod<sup>1</sup>, Vincent Regard<sup>2</sup>, Julie Carcone<sup>2</sup>, Robert Wyns<sup>3</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Ramonville-Saint-Agne

<sup>2</sup>GET, Toulouse

<sup>3</sup>BRGM, Orléans

Flat and high-elevation surfaces in the Pyrenees are known to be created during the post-orogenic phase between the end of Oligocene until Pliocene times. They are often made of weathered material, particularly well developed over granitic substrates, where they have resisted the glaciations. On such substrates the surfaces represent the top of a weathering profile. We focus here on two granitic areas : the Borderes-Louron granite and the Aston massif. The work has been processed with two different means : (1) a GIS approach classifying the surfaces with slope lower than 10 degrees in a similar way than Calvet and Gunnell (2008) did and (2) a field work reporting observations of the weathering degree, in particular (from depth to surface) : the lower and upper fissured zone and the unconsolidated alterites. We highlight 2 to 3 surface levels with sometimes a thick weathered profile (>50 m) possibly entrenched into the relief. A polyphase development is clearly proved by different chronological information : in one location the weathering developed just before the Triassic, elsewhere it is clearly much younger. Additional work is needed to date the weathering and to indicate if these surfaces can be used as post-orogenic deformation markers.

Calvet, M., Gunnell, Y., 2008. Planar landforms as markers of denudation chronology : an inversion of East Pyrenean tectonics based on landscape and sedimentary basin analysis. Geological Society, London, Special Publications 296, 147-166. doi : 10.1144/SP296.10

### 1.4.4 (o) Synthesis of ages obtained by paleomagnetism on ferricretes and iron-rich sediments of New Caledonia. Implications on the morphogenesis of Grande-Terre

Caroline Prognon<sup>1,2</sup>, Brice Sevin<sup>3</sup>, Nicolas Folcher<sup>4</sup>, Pierre Maurizot<sup>1</sup>, Dominique Cluzel<sup>4</sup>, Florence Quesnel<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orleans

<sup>2</sup>ISTO, Orléans

<sup>3</sup>*Service Géologique de Nouvelle Calédonie, Nouméa, Nouvelle-Calédonie*

<sup>4</sup>*Pôle Pluridisciplinaire de la Matière et de l'Environnement, Université de Nouvelle Calédonie, Nouméa, Nouvelle-Calédonie*

Although the description of the emplacement and the weathering of the New Caledonia peridotites are well documented, the reconstruction of the planation surfaces formed upon the ultrabasic massifs are poorly documented. Ambiguities remain on the timing and modality of weathering and related supergene nickel ore. The data and interpretations presented here are based on paleomagnetic analysis of lateritic ferricretes and fluvial sediments. In Tiébaghi an age of 25 Ma has been obtained along a section crossing the plateau. Well constrained ages of 0-5 Ma to 25 Ma have been obtained in Goro, highlighting possible stepped paleosurfaces. The Tiébaghi Massif displays a single episode of ferricrete development during latest Oligocene times, whereas the Goro site reveals several episodes of ferricrete development from latest Oligocene to Pliocene-Quaternary times. Samples from the Kopeto-Boulinda Massif and lower Nepoui surfaces have been further studied; they could not be dated by paleomagnetism, except the silico-ferruginous matrix of the Nepoui conglomerate giving an age close to 10-25 Ma. This age is rather imprecise but 1) the weathering of the fluvial conglomerates fossilized by the silicification followed their deposition and 2) the conglomerates are locally interstratified in Lower Miocene marine limestones. Moreover the detailed petrographic study of the ferricretes confirms rearrangements of nodules and pisolites, more important in the upper parts of the toposequence, where they also follow the smooth slopes of the topography. They probably result from the dismantling of early lateritic ferricrete and laterites capping a former landscape. All the data can be interpreted in reconstructing a fossil paleolandscape in New Caledonia triggered by a Lower Miocene uplift, responsible for the drastic erosion of the oldest profiles, the creation of highly incised river systems and the deposition of coarse fluvial conglomerates.

In the Fluvio-lacustrine Fm of the southern Grande Terre, new paleomagnetic data enable to reconstruct old (25 to 15 Ma) ferruginisation episodes interstratified within fluvial units, while younger (0-5 Ma) secondary concretioning phases are also recorded. They could be attributable to recent incision of the succession, until the creation of the current hydrographic network.

#### 1.4.5 (o) La modélisation du Régolithe : enjeux et applications

Anne Bialkowski<sup>1</sup>, Bruno Tourlière<sup>1</sup>, Caroline Ricordel-Prognon<sup>1</sup>, Florence Quesnel<sup>1</sup>, Hélène Tissoux<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

L'intérêt porté aux formations superficielles ou « régolithe » suscite une demande croissante, non seulement en termes de connaissances géologiques (cartographie, nature, origine, processus de formation) mais aussi en termes d'enjeux pour les territoires (aménagement, risques, gestion des ressources) et donc d'intérêts économiques.

Le BRGM a réalisé en 2009 un premier état des lieux de la connaissance du Régolithe en France métropole, à l'échelle du 1/1 000 000, aussi bien pour les terrains alloctones (dépôts continentaux liés aux processus de transport) que pour les terrains autochtones (profils d'altération météorique). Ce travail, actualisé en 2013, a mis en évidence une forte hétérogénéité de la qualité de l'information géologique disponible et cible le travail à réaliser, en particulier sur le terrain.

La modélisation géométrique des unités géologiques constituant le Régolithe est un outil incontournable pour faire progresser la connaissance de la distribution spatiale des formations. L'application de cet outil, étroitement associée aux connaissances géologiques connues, constitue une première approche et un guide pour le développement d'une

stratégie d'acquisition. La méthodologie mise en œuvre dans le cadre de la modélisation des formations du régolithe allochtone et autochtone, réalisée sous GDM-Multilayer, à l'échelle de chaque département, puis assemblée à l'échelle d'une région, s'appuie sur les cartes géologiques disponibles et les données des forages de la Banque de Données du Sous-Sol.

Ce travail a été réalisé dans un premier temps à l'échelle de la région Bretagne. Les cartes des données interpolées (toit et épaisseur) mettent aussi en évidence des résultats sur-ou sous-évalués dans certaines zones géographiques, ce qui incite à s'interroger à la fois sur la pertinence des données d'entrée du modèle et sur la nécessité d'un contrôle local sur le terrain.

#### 1.4.6 (p) Etudes pétrographiques des cuirasses latéritiques et sédiments ferrugineux de Nouvelle Calédonie : une clé pour interpréter les datations par paléomagnétisme

Caroline Prognon<sup>1,2</sup>, Brice Sevin<sup>3</sup>, Pierre Maurizot<sup>1</sup>, Lilian Alizert<sup>3</sup>, Dominique Cluzel<sup>4</sup>, Florence Quesnel<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>ISTO, Orléans

<sup>3</sup>*Service Géologique de Nouvelle Calédonie, Nouméa, Nouvelle-Calédonie*

<sup>4</sup>*Pôle Pluridisciplinaire de la Matière et de l'Environnement, Université de Nouvelle Calédonie, Nouméa, Nouvelle-Calédonie*

Le paléomagnétisme est dans certains cas particuliers l'unique méthode possible pour dater paléosurfaces d'altération et sédiments ferrugineux. C'est le cas en Nouvelle Calédonie où plusieurs surfaces étagées ont été reconnues sur l'ensemble de la Grande Terre (Trescases, 1975 ; Latham, 1986 ; Chevillotte et al., 2006). Ces surfaces ne peuvent être calées dans le temps par (bio)stratigraphie, puisqu'elles ne sont jamais recouvertes par des sédiments avec de la faune ou de la flore. Elles ne peuvent pas être datées non plus par des méthodes radiométriques sur oxydes de manganèse, car les concentrations en potassium sont trop faibles dans ces profils d'altération sur péridotites. Seul le paléomagnétisme permet donc de dater ces surfaces.

Des études pétrographiques ont été réalisées de manière systématique sur les différentes surfaces cuirassées de Nouvelle Calédonie et sur les bancs ferrugineux de la série fluvio-lacustre. Les observations réalisées ont permis d'avancer des hypothèses quant à la compréhension des résultats obtenus par paléomagnétisme sur les massifs du Kopéto et du Boulinda et jusqu'aux surfaces étagées en contrebas, autour de Népoui, en montrant plusieurs phases de remobilisation de cuirasse et de silicification, alors qu'aucune différence n'était visible d'un point de vue géomorphologique, ni macroscopique. Nous avons ainsi mis en évidence des faciès de cuirasses "favorables" aux datations paléomagnétiques, comme par exemple à Goro ou Tiébaghi (Sevin et al., 2012) et des faciès "défavorables", comme par exemple sur les massifs du Kopéto, du Boulinda et les hautes surfaces autour de Népoui. Aujourd'hui les études pétrographiques sont essentielles pour cibler les sites d'échantillonnage pour paléomagnétisme et pour interpréter les résultats obtenus.

Chevillotte V., Chardon D., Beauvais A, Maurizot P. & Colin F. (2006). Long-term tropical morphogenesis of New Caledonia (Southwest Pacific) : Importance of positive epeirogeny and climate change, *Geomorphology*, 81, 361-375

Latham M. (1986). Altération et pédogenèse sur roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie. DG : Doctoral DI : Univ. Dijon. Dijon, France. 331 p.

Trescases J.J. (1975) L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale : Formation des gisements nickelifères de Nouvelle-Calédonie, *Mémoires ORSTOM*. 78.

## 1.5 Dynamique de la lithosphère et déformations actives : Intégration multi-méthodes de la géodésie à la paléo-sismologie (CNFGG)

### Responsables :

- Matthieu Ferry (Géosciences Montpellier)  
matthieu.ferry@gm.univ-montp2.fr
- Frédéric Masson (IPG Strasbourg)  
frederic.masson@unistra.fr
- Stéphane Mazzotti (Géosciences Montpellier)  
stephane.mazzotti@gm.univ-montp2.fr

### Résumé :

La compréhension des processus géodynamiques et de tectonique active bénéficie de l'intégration de multiples méthodes depuis la géodésie et géophysique, jusqu'à la géomorphologie et géologie. L'objectif de cette session est de fournir un forum aux chercheurs français et européens qui s'intéressent aux récents développements apportés par ce type d'intégration d'observations de terrain (GPS, gravité, sismologie, géomorphologie, taux d'érosion, paléo-sismologie, etc.) dans la cadre de modèles conceptuels et de modèles numériques des orogènes, marges passives, grandes failles actives, zones de déformation intraplaques, etc.

### 1.5.1 (o) Could Erosion in the Western Alps triggers large earthquakes in the Ligurian basin ?

Manon Genti<sup>1</sup>, Jean Chéry<sup>1</sup>, Philippe Vernant<sup>1</sup>, Christophe Larroque<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Géosciences Montpellier*  
<sup>2</sup>*GEOAZUR, Sophia Antipolis*

Earthquakes express present-day deformation at the Alps-Ligurian basin junction. Convergence rates across the Western Alps are below the uncertainty threshold of the continuous GPS measurements (<0.3 mm/yr), but unexpectedly, the vertical rates derived from the GPS are significant and up to 2 mm/yr. Furthermore, the range is underlined by moderate but frequent instrumental seismicity. Focal mechanisms show extension in regions of moderate to high elevations with a direction normal to the Western Alps range axis, while their foreland is associated to strike slip and thrust faulting. How can be explained these very high uplift rates and seismotectonic regime in an intraplate like kinematic deformation pattern remains an open question.

Recent 2D finite element models have tried to answer to this question by showing that erosion of mountain topography in low convergent zones induces a significant deformation of the lithosphere. These models suggest two distinct seismotectonic zones characterized by extension and uplift below the moderate to high topographic mountain range and shortening in foreland. However, these models were not applied to a specific case study.

The last deadly earthquake was in 1887, in Ligurian Basin, with an estimated magnitude of Mw=6,7. Many hypotheses are suggested to explain this active deformation. Using a 2D cross-section of the Alpine-Ligurian margin, we study the effects of the processes surface impact on the deformation pattern of the Ligurian Basin, and the possible triggering of earthquake like the 1887 one.

### 1.5.2 (o) Estimation de la vitesse de glissement et du temps de récurrence des forts séismes sur le chevauchement Ligure (Méditerranée occidentale) à partir de marqueurs géomorphologiques et de données de sismicité instrumentale (résultats du projet ASTARTE, CE-FP7)

Christophe Larroque<sup>1</sup>, Françoise Courboux<sup>1</sup>, Jenny Trévisan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*GEOAZUR, Sophia Antipolis*

Le séisme Ligure du 23 février 1887 (Mw 6.7-6.9) s'est produit au large de la Riviera Ligure sur un chevauchement à pendage vers le nord. Sur la marge nord Ligure, de nombreux séismes modérés (Mw < 5) présentent des mécanismes au foyer en faille inverse et attestent d'un état de contrainte compressif. L'analyse morphotectonique montre que le soulèvement de cette marge est actif depuis au moins le Messinien (5 Ma). La zone soulevée est limitée par un système de failles inverses actives en pied de pente, certainement connectées au chevauchement Ligure qui contrôle le soulèvement de la marge nord du bassin. Les vitesses horizontales mesurées par GPS entre le bloc Corse-Sardaigne et la Riviera Ligure sont très faibles. Comme dans toutes les zones à faible taux de déformation, la détermination du temps de récurrence des forts séismes est difficile, d'autant plus lorsque la faille active est en mer. Nous faisons ici l'hypothèse simple que le soulèvement de la marge est accommodé par le chevauchement Ligure et résulte essentiellement du cumul de séismes équivalents au séisme de 1887 (géométrie de la faille, glissement co-sismique...). Nous utilisons plusieurs repères temporels : sur le littoral (replats d'érosion du stade MIS 5.5 d'une part et d'âge

Holocène d'autre part) et sur la marge (discordance messinienne) afin d'estimer la vitesse moyenne de soulèvement du compartiment nord du chevauchement sur ces intervalles de temps et d'en déduire la vitesse de glissement de la faille et le temps de récurrence pour des séismes de magnitude 6,7-6,9. Le même travail a été réalisé à partir du taux de raccourcissement horizontal mesuré par les stations cGPS de Nice et d'Ajaccio. L'ensemble de ces résultats conduit à des temps de récurrence proches, compris dans une fourchette allant de 1500 à 4000 ans. Ces temps de récurrence sont comparés aux résultats d'une analyse de la sismicité instrumentale par des courbes de Gutenberg-Richter (à partir des catalogues LDG, BCSF et Dister) pour la zone sismotectonique nord Ligure.

### 1.5.3 (o) Last interglacial marine terraces and geodynamics

Vincent Regard<sup>1</sup>, Hadrien Henry<sup>1</sup>, Kevin Pedoja<sup>2</sup>, Laurent Husson<sup>3</sup>, Joseph Martinod<sup>1</sup>, Cesar Witt<sup>4</sup>, Arnauld Heuret<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*GET, Toulouse*

<sup>2</sup>*M2C, Université de Caen Basse-Normandie*

<sup>3</sup>*ISTerre, Grenoble*

<sup>4</sup>*Laboratoire Géosystèmes, Lille*

<sup>5</sup>*Département de Géologie, Université des Antilles et de la Guyane, Pointe à Pitre, Guadeloupe*

Past studies have shown that high coastal uplift rates are restricted to active areas, especially in a subduction context. The origin of coastal uplift in subduction zones, however, has not yet been globally investigated. Quaternary shorelines correlated to the last interglacial maximum (MIS 5e) were defined as a global tectonic benchmark (Pedoja et al., 2011). In order to investigate the relationships between the vertical motion and the subduction dynamic parameters, we cross-linked this coastal uplift database with the « geodynamical » databases from Heuret (2005), Conrad and Husson (2009) and Müller et al. (2008). Our statistical study shows that : (1) the most intuitive parameters one can think responsible for coastal uplift (e.g., subduction obliquity, trench motion, oceanic crust age, interplate friction and force, convergence variation, dynamic topography, overriding and subducted plate velocity) are not related with the uplift (and its magnitude) ; (2) the only intuitive parameter is the distance to the trench which shows in specific areas a decrease from the trench up to a distance of ~300 km ; (3) the slab dip (especially the deep slab dip), the position along the trench and the overriding plate tectonic regime are correlated with the coastal uplift, probably reflecting transient changes in subduction parameters. Finally we conclude that the first order parameter explaining coastal uplift is small-scale heterogeneities of the subducting plate, as for instance subducting aseismic ridges. The influence of large-scale geodynamic setting of subduction zones is secondary.

### 1.5.4 (o) Flexion de la lithosphère océanique le long de la marge algérienne et implications tectoniques

Lamine Hamai<sup>1</sup>, Carole Petit<sup>2</sup>, Abdeslem Abtout<sup>1</sup>, Abdelkarim Yelles-Chaouche<sup>1</sup>, Jacques Déverchère<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Centre de recherche en astronomie, astrophysique et géophysique, Alger, Algérie*

<sup>2</sup>*GEOAZUR, Sophia Antipolis*

<sup>3</sup>*IUEM, Plouzané*

La marge Algérienne située au nord de l'Afrique, résulte d'une ouverture en arrière-arc du bassin Algérien associé à un retrait du slab téthysien. Des données géophysiques récentes acquises dans le bassin Algérien (campagnes MARADJA, 2003, 2005 (MARge Active de « el

DJazaïr » et SPIRAL, 2009 (Sismique Profonde et Investigations Régionales en Algérie) ont permis d'identifier des indices de la déformation compressive active ou récente dans le bassin.

Les nouvelles données de 4 profils sismique grand-angle ont permis d'imager pour la première fois la structure profonde de la marge Algérienne et de son bassin adjacent. Nous avons converti ces modèles de vitesse en modèles de densité, puis en anomalies isostatiques. Ceci nous a permis d'imager un déséquilibre isostatique (par rapport à un modèle d'isostasie locale) marqué au niveau du pied de pente de la marge. Si l'on interprète cela comme des variations de profondeur du Moho par rapport à une profondeur d'équilibre, alors le Moho dans le domaine océanique est trop profond, et le Moho continental trop superficiel, de part et d'autre d'une limite située vers le pied de cette marge. Ces anomalies peuvent être interprétées par un mécanisme de flexure des deux lithosphères en présence.

Nous utilisons ensuite une formulation en éléments finis et l'hypothèse d'une plaque mince élastique pour pouvoir modéliser cette flexure. Les quatre profils sont discrétisés chacun en deux plaques séparées au niveau du pied de marge. La déflexion aux deux extrémités des plaques est fixée à zéro, et des forces et/ou des moments peuvent être appliqués sur la zone de contact entre les deux plaques. La rigidité peut varier d'une plaque à l'autre ou au sein d'une même plaque.

L'interprétation préliminaire de cette modélisation nous montre une différence flexurale entre les profils centraux et latéraux, cela est probablement dû à la différence de géométrie des segments de marge et leurs évolutions dans le contexte géodynamique et cinématique.

### 1.5.5 (o) Combining GPS and geomorphology data to constrain strain partitioning and transfer across the SW Yukon - SE Alaska orogen

Anaïs Maréchal<sup>1</sup>, Stéphane Mazzotti<sup>1</sup>, Jean-François Ritz<sup>1</sup>, Matthieu Ferry<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Geosciences Montpellier

In SW Yukon - SE Alaska, the present-day Pacific - North America relative motion (~55 mm/yr) is highly oblique to the main plate boundary, resulting in strong strain-partitioning tectonics that link the Aleutian subduction to the west to Queen Charlotte transform to the south. This transition region is also the site of present-day orogeny (St Elias). GPS and geomorphology datasets are integrated to characterize and quantify strain patterns in this transpressional system, with particular emphasis on strain partitioning between strike-slip and shortening deformation. New campaign and permanent GPS stations straddling the main faults indicate that 95% of the Pacific-North America strike-slip motion is accommodated on the main plate-boundary Fairweather Fault, leaving near-zero motion on the Denali Fault only ~100 km inboard. In contrast, the fault-perpendicular component is strongly distributed between shortening offshore and in the orogen, and 25% of the convergence transferred inland.

In the region of highest convergence obliquity, GPS data show diffuse indentor-like deformation, with strong along-strike variations of the main fault slip rates. A regional geomorphology study gives further information about the main faults, along which previous data suggest significant along-strike velocity variations. A high resolution DEM (2m) processed from Pleiades data acquired in September 2013 highlights significant vertical deformation on the Denali fault. Systematic metric scale displacements are measured along the « inactive » part of the fault, showing recent deformation since the Last Glacial Maximum in the region (~20 kyrs ago). Sampling of geomorphological markers for Be10 and OSL datation is planned in the summer 2014 in order to estimate slip rates along the southern part of the main transpressional faults.

### 1.5.6 (p) Changement majeur du régime de déformation tectonique des Alpes occidentales depuis les années 80-90 : phénomène exceptionnel, fréquent ou artefact ?

Gilles Ménard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EDYTEM, Le Bourget du Lac

Un certain nombre de comparaisons de données géodésiques historiques acquises par l'IGN durant le XX<sup>e</sup> siècle dans les Alpes occidentales ont montré des déplacements significatifs tant sur les données altimétriques (comparaisons de nivellements) que planimétriques (comparaisons de triangulations). La plupart de ces résultats ont fait l'objet de mesures ultérieures destinées à les valider et à les préciser (densification). A l'exception des zones d'affaissement localisé (plaines alluviales) qui confirment les vitesses historiques, toutes les autres mesures, en particulier les failles, montrent une modification des vitesses depuis la dernière mesure de l'IGN (années 80). Il s'agit le plus souvent d'un arrêt ou d'un ralentissement des déformations, mais parfois d'une inversion des mouvements (Maurienne, avec un affaissement de l'amont de la vallée à 1-2 mm/an passant à une surrection à 4-5 mm/an après 1995). La question du caractère exceptionnel ou fréquent de ce type de modification reste posée ainsi que celle de savoir si c'est le régime d'avant ou d'après les années 90 qui est le plus représentatif de la déformation longue durée. L'éventualité que ces modifications soient un artefact lié au changement de technique de mesure (passage du traditionnel au GPS) peut être envisagée pour la planimétrie mais pas pour l'altimétrie, laquelle concentre la majorité des observations. La modification cinématique minimale qu'il faut envisager pour rendre compte d'une grande partie des observations est l'arrêt/modification d'une composante extensive transverse à la chaîne localisée entre les massifs cristallins externes et les zones internes (autour du front pennique). La rapidité de ce changement n'est guère compatible qu'avec une modification (arrêt ou mise en place) de circulations de fluides aux profondeurs contrôlant les décollements crustaux, circulations devant ainsi présenter un caractère intermittent.

### 1.5.7 (p) Déformation active de la marge sud du Bassin Ligure (Méditerranée occidentale) : implication pour les aléas sismique et tsunami

Christophe Larroque<sup>1</sup>, Bertrand Delouis<sup>1</sup>, Marc Régnier<sup>1</sup>, Françoise Sage<sup>1</sup>, Françoise Courboux<sup>1</sup>, Anne Deschamps<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

Le 07/07/2011 un séisme modéré (ML 5,4) s'est produit 80 km à l'ouest d'Ajaccio dans une zone où la sismicité instrumentale semble très faible. Cet événement est le plus important d'une série de 6 séismes modérés (3,8 < ML < 5,4) qui se sont produits dans cette zone depuis juillet 2011. Cette séquence sismique est localisée dans le bassin océanique Ligure, à la limite avec la zone de transition océan/continent de la marge sud Ligure. Dans la zone épiscopale, la morphologie est plate et aucun escarpement de nature tectonique n'est détecté (à la résolution des données). En 2012, nous avons acquis des profils de sismique multi-traces (campagne FABLES) sur la zone épiscopale. Ces profils imagent les couches sédimentaires jusqu'à la base du Messinien. Les couches sont subhorizontales et seulement perturbées par le diapirisme salifère. Aucune faille n'est visible entre le fond marin et la profondeur de pénétration maximum (~3 km). A partir d'une modélisation complète des formes d'ondes, notre meilleure estimation de la profondeur focale du choc principal (07/07/2011 ; ML 5,4) est de 10 km. Le mécanisme au foyer est en compression et cohérent avec l'état de contrainte régional.

Sur la marge nord Ligure, (1) la sismicité instrumentale atteste d'une forte activité microsismique, (2) des séismes historiques forts sont répertoriés (e.g. 1887/02/23 ; Mw 6,7-6,9) et (3) de grandes déformations cumulées depuis 5 Ma. sont localisées à la transition océan-continent. Les observations réalisées sur la partie sud du Bassin Ligure attestent que cette zone se déforme. Cependant, l'absence de déformation cumulée et de failles traversant la couverture sédimentaire nous incite à penser que ces déformations, et les séismes associés, restent faibles. Ainsi, seule une faible partie de la déformation régionale serait accommodée dans la zone sud Ligure, le long de failles bordant le bloc Corse-Sardaigne. Par conséquent, l'aléa sismique et tsunami y serait plus faible que dans la partie nord du bassin.

### 1.5.8 (p) Structure of the Thénia Active Fault Zone (north-central Algeria)

Hakim Moulouel<sup>1</sup>, Rabah Bensalem<sup>1</sup>, Djamel Machane<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CGS, Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, Alger, Algérie

The Mitidja basin is the site of a moderate-to-strong seismicity associated with the active geological structures. Its north-eastern boundary is marked by a dextral strike-slip fault (Thénia Fault Zone) oriented N120° (directions are noted NXXX°), which connects the basin sedimentary levels with the granodioritic Thénia block. This strike-slip fault, clearly visible in Thénia and Boumerdes surrounding, seems to extend further west. According to Boudiaf (1996, 1998), on the basis of the river pattern disturbances, the existence of stepped alluvial terraces and the Pliocene levels which are affected by a scarp oriented N120°, the Thénia Fault Zone would be the site of a seismic activity. But definitive evidence of Quaternary displacement on this fault has not been reported. In order to try to characterize the internal structure of Thénia Fault Zone and its seismogenic potential we interpreted new data collected from meso-scale field structural analysis and geophysical data acquisition. In general, data revealed a more complex structure compared to what is considered on this fault. The presence of a major gently north-dipping thrust whose emergence correspond with the classical marl/granodiorite interface and overprinting all strike-slip old structures suggest a thrust geometry at depth and a possible recent associated seismogenic potential with respect to the globally NE-oriented active proven faults in north Algeria.

### 1.5.9 (p) Seismic slip history of normal faults in central Apennines (Italy) using in situ 36Cl cosmogenic exposure dating and rare earth elements concentrations

Jim Tesson<sup>1</sup>, Lucilla Benedetti<sup>1</sup>, Bruno Pace<sup>2</sup>, Francesco Visini<sup>3</sup>, Matteo Delli Roccoli<sup>2</sup>, Didier Bourlès<sup>1</sup>, Georges Aumaitre<sup>1</sup>, Maurice Arnold<sup>1</sup>, Karim Keddadouche<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>Università degli studi G. d'Annunzio Chieti Pescara, Chieti, Italie

<sup>3</sup>Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma, Italie

Acquiring long records of past earthquakes on a large population of faults is important to understand how strain release along those fault systems varies in space and time. In central Italy, NE-SW extension (~4 mm/yr) is accommodated on a wide normal fault system (50 x 100km). Benedetti et al. (2013) found that 7 of those faults, belonging to the Fucino fault system, have their seismic activity synchronized during short (less than 1 ka) paroxysmal phases of activity. 36Cl measurements and rare earth elements (REE) concentrations were used to reconstruct the

seismic slip history of two major faults belonging to an adjacent fault system. The preliminary results suggest that these two faults (the Pizzalto fault and the Roccapreturo fault), 30 km apart, ruptured with a pattern similar to that of the Fucino faults. 4 to 6 seismic events occurring on both faults 3.5 ka to 2 ka ago generate an associated cumulative displacement of about 4m. This suggests that both faults ruptured simultaneously in less than 1.5 ka. REE measurements support the 36Cl seismic history and the processes that build REE patterns on a fault scarp are discussed.

### 1.5.10 (p) Tri-stereo Pleiades images-derived digital surface models for tectonic geomorphology studies

Matthieu Ferry<sup>1</sup>, Romain Le Roux-Mallouf<sup>1</sup>, Jean-François Ritz<sup>1</sup>, Théo Berthet<sup>1</sup>, Michel Peyret<sup>1</sup>, Philippe Vernant<sup>1</sup>, Anaïs Maréchal<sup>1</sup>, Rodolphe Cattin<sup>1</sup>, Stéphane Mazzotti<sup>1</sup>, Antoine Poujol<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier

Very high resolution digital elevation models are a key component of modern quantitative geomorphology. In parallel to high-precision kinematic GPS, total station surveys and dense coverage LiDAR campaigns, we explore the usability of affordable, flexible, wide coverage digital surface models (DSMs) derived from Pleiades tri-stereo optical images. We present two different approaches to extract DSM from a triplet of images. The first relies on the photogrammetric extraction of 3 DSMs from the 3 possible stereo couples and subsequent merge based on the best correlation score. The second takes advantage of simultaneous correlation over the 3 images to derive a point cloud. We further extract DSM from panchromatic 0.5 m resolution images and multispectral 2 m resolution images to test for correlation and noise and determine optimal correlation window size and achievable resolution. Georeferencing is also assessed by comparing raw coordinates derived from Pleiades Rational Polynomial Coefficients to ground control points.

In order to assess the adequacy of Pleiades DSMs for tectonic geomorphology, we present examples from case studies along the Trougout normal fault (Morocco), the Hovd strike-slip fault (Mongolia), the Denali strike-slip fault (USA and Canada) and the Main Frontal Thrust (Bhutan). In addition to proposing a variety of tectonic contexts, these examples cover a wide range of climatic conditions, vegetation covers, lithological natures and related erosion rates. The capacity of derived DSMs is demonstrated to characterize geomorphic markers of active deformation in terms of vertical (from DSMs) and horizontal (from orthorectified optical images) offsets. Values extracted from Pleiades DSMs compare well to field measurements in terms of relief and slope, which suggests effort and resources necessary for field topography could be significantly reduced, especially in poorly accessible areas.

### 1.5.11 (p) Quaternary tectonics, regional structure and location of reverse fault accident East-West Djebel Kellal the Constantine region (north-east of Algeria)

Ouided Laziz<sup>1</sup>, Moussa Boularak<sup>1</sup>, Benabbas Chaouki<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université Constantine, Algérie

Jebel Kellal is one of massive neritic Cretaceous Constantine limiting the basin of Hamma Bouziane (Northern Constantine). On the geological map and satellite photo, this monoclinial series of Cretaceous age is organized affording to a transverse structure (East-West), this particular structure (perfect linearity of carbonate series, and implementation of Triassic formations) gives a seismic, deep structure appearance limiting Constantine neritic.

Nearly 4km long. This carbonated series showed a variation of dips from

0° to 90°, collapses shoals, instabilities quaternary formations, geotechnical anomalies (the thickness of neritic carbonates observed during the excavation of the tunnel), it pushed us to apply the model of a system of reverse fault dipping slope (M. Mattawer, 1973) which is in contradiction with the classical structural diagram presented by JM, Vila (1974) in this region. To the east of this mountain, the Plio- Quaternary travertines of Hamma Bouziaine is bounded by vertical faults N100°. At the regional level this structure is identified in a morphostructural card (from aerial photo) made on the Constantine region, it is a segment of a transverse structure limiting the neritic Constantine.

### 1.5.12 (p) Estimation de l'atténuation des ondes Lg sous le continent africain

Issak Adoum<sup>1</sup>, Christian Camerlynck<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université de N'Djamena, faculté des Sciences Exactes et Appliquées,  
 N'Djaména, Tchad

<sup>2</sup>SISYPHE, Paris

La station sismologique d'Abéché (ABC) située au Tchad bénéficie d'un bruit de fond très faible et possède de ce fait une grande capacité de détection des événements sismiques. En particulier, elle enregistre de manière remarquable les ondes Lg se propageant dans la croûte, y compris sur des trajets de quelques milliers de kilomètres, permettant ainsi la détection des séismes de magnitude moyenne situés à la périphérie nord et est de l'Afrique. Nous étudions l'atténuation de ces ondes en estimant le facteur de qualité Q<sub>0</sub> à partir de la décroissance de la coda. Cette étude porte sur 69 séismes enregistrés à ABC suivant zones sources situées au nord de l'Afrique, au Moyen Orient, ou en bordure des rifts est-africains. Les séismes étudiés, de magnitude comprise entre 4.5 et 6, sont enregistrés à des distances allant de 1700 km à 3600 km. L'étude nous a permis de mesurer un facteur de qualité moyen dans les différentes zones sismiques identifiées : Afrique du Nord (650), Mer Rouge-Turquie (630), Afrique de l'Est (690). Ces valeurs sont compatibles avec celles mesurées pour le craton congolais (460 à 760) et pour le craton du Kalahari (560 à 580).

Un point particulier concerne le séisme du 11/04/2010 ayant lieu au sud de l'Algérie à une distance de 1822 km de la station ABC, très bien enregistré aussi par la station de Tamanrasset (TAM) en Algérie distante de 70 km environ. Les valeurs relativement proches entre les estimations de Q<sub>0</sub> à ABC (794) et à TAM (798) confirment d'une part la qualité des résultats, et d'autre part la stabilité de l'atténuation dans la région étudiée.

## 1.6 Imagerie des failles actives (CNFGG)

### Responsables :

- Stéphane Garambois (ISTerre, Grenoble)  
stephane.garambois@ujf-grenoble.fr
- Marie-Pierre Doin (ISTerre, Grenoble)  
marie-pierre.doin@ujf-grenoble.fr

### Résumé :

Nous suscitons des contributions dans le domaine de l'imagerie des failles actives, permettant de contraindre de façon quantitative le fonctionnement des failles, à l'échelle du cycle sismique ou à plus long terme. Les techniques d'observation incluent l'imagerie géophysique (géoradar, sismique, électromagnétique,...), le GPS, l'InSAR, la télédétection et la géomorphologie. Les techniques géodésiques permettent de mesurer la déformation, partiellement réversible, associée aux phases intersismique, co-sismique et post-sismique, pour en déduire les variations latérales du glissement sur les failles. L'imagerie géophysique peut permettre de contraindre les orientations des failles, mais également d'imager des marqueurs enfouis, décalés par le fonctionnement des failles. L'ensemble de ces mesures peut être comparé aux sauts co-sismiques de séismes historiques, à la segmentation des failles, à des décalages datés de terrasses, moraines ou de marqueurs enfouis, à des taux d'incision, etc., mesurés par géomorphologie et télédétection. Le lien entre comportement sismogène, segmentation et déformation long-terme pourra être exploré. Nous attendons des contributions à la fois sur les failles continentales et les zones de subduction.

### 1.6.1 *Keynote communication* : Utilisation de la déformation géodésique pour caractériser la rhéologie des failles

Hugo Perfettini<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IRD/ISterre, Grenoble, Marseille

L'essor de la Géodésie a permis la mise en évidence de nouveaux processus dynamiques tels que le glissement post-sismique et les séismes lents, illustrant le rôle fondamental que joue les zones silencieuses « sismiquement » dans le cycle sismique. Ces zones, en glissement stable dans la phase inter-sismique, peuvent avoir une dynamique complexe. Les modèles cinématiques dérivés de l'inversion de données géodésiques telles que les données GPS (Global Positioning System) ou InSAR (interferometric synthetic aperture radar) permettent d'entrevoir la rhéologie des failles actives. Nous passerons en revue quelques exemples de séismes récents et présenterons des modèles physiques en accord avec les observations.

### 1.6.2 (o) Caractérisation multi-échelle des décrochements vénézuéliens : ce que l'imagerie InSAR et GPR apportent à la morphotectonique et à la paléosismologie

Lea Pousse<sup>1</sup>, Riccardo Vassallo<sup>1</sup>, François Jouanne<sup>1</sup>, Erwan Pathier<sup>2</sup>, Franck Audemard<sup>3</sup>, Julien Carcaillet<sup>2</sup>, Jelime Aray<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ISterre, Le Bourget du Lac

<sup>2</sup>ISterre, Grenoble

<sup>3</sup>Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, El Llanito, Caracas, Venezuela

Les grands décrochements actifs du Nord du Venezuela sont à l'origine de séismes historiques ayant affectés la population locale au cours des derniers siècles. Pour mieux comprendre le comportement de ces failles dans le temps et caractériser leur activité, nous proposons de réaliser une étude de la déformation à l'échelle de plusieurs cycles sismiques. Nous présentons les résultats préliminaires d'une étude à long terme sur le segment Nord de la faille de Boconó. En effet, nous mesurons les déplacements cumulés des cônes alluviaux faillés, et datons leur abandon par <sup>10</sup>Be in-situ afin d'en estimer une vitesse de déplacement quaternaire de cette extrémité de la faille encore mal connue. Cette vitesse, associée à l'étude des ruptures co-sismiques dans une tranchée paléosismologique, permettra d'améliorer nos connaissances sur le comportement sismique au cours du temps et la période de récurrence des séismes majeurs. Grâce à des profils GPR réalisés à travers la zone de faille nous avons pu imager les premiers mètres du sol dans la zone de déformation. Cette imagerie préalable au creusement de la tranchée s'est révélée très utile pour délimiter la largeur de la zone endommagée et avoir des informations de premier ordre sur la nature et la géométrie des marqueurs sédimentaires. Ces données de sub-surface sont donc très précieuses pour le choix et le bon dimensionnement du futur site de tranchée. Cette analyse à long terme sera complétée par une analyse InSAR sur la base de 17 images ALOS (récepteur PALSAR) acquises entre 2007 et 2011. Cette étude, associée aux données GPS existantes, permettra d'estimer la déformation actuelle de cette faille, son comportement sismique-asismique, la détection d'éventuelles aspérités, et la profondeur de blocage du déplacement le long de la faille, paramètre contrôlé par la rhéologie. Ces évaluations sont nécessaires à l'estimation de l'aléa sismique et à la compréhension de l'expression morphotectonique actuelle de la faille.

### 1.6.3 (o) Imagerie multi-échelles d'un système de failles décrochantes potentiellement actives dans la plaine du Pô

Aurélien Bigot<sup>1</sup>, Isabelle Manighetti<sup>1</sup>, Guy Sénéchal<sup>2</sup>, Stéphane Garambois<sup>3</sup>, Christophe Larroque<sup>1</sup>, Jacques Malavieille<sup>4</sup>, Giancarlo Molli<sup>5</sup>, Nathalie Cotte<sup>3</sup>, Elodie Delor<sup>1</sup>, Edouard Palis<sup>1</sup>, Hugo Pinard<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>2</sup>IPRA, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau

<sup>3</sup>ISterre, Grenoble

<sup>4</sup>Géosciences Montpellier

<sup>5</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa, Pisa, Italie

Sur la base d'une étude morphotectonique (images satellitaires Pléiades haute résolution, MNT SRTM & ASTER), nous avons identifié un système de failles décrochant sénestre (avec une composante inverse) potentiellement actif s'étendant entre Nice et Turin, dans une direction ~N-S. Ces failles n'ont jamais été décrites. Plusieurs segments du système de failles se situent dans la plaine du Pô, dans le bassin de Cuneo. Ils sont localement soulignés de séismes instrumentaux et sont en partie responsables du soulèvement des terrasses alluviales Quaternaires des rivières Stura et Tanaro. L'analyse morphotectonique (traces en surface, fraîcheur des escarpements) plaide en faveur de l'activité tectonique récente de ces failles mais ne permet pas de le démontrer. Afin de mieux contraindre cette activité, nous avons réalisé des mesures GPR (Ground Penetrating Radar) pseudo-3D en deux sites des failles, avec deux antennes différentes (250 MHz blindée et 100 MHz RTA). En chacun des sites, nous avons réalisé plusieurs dizaines de profils perpendiculaires et parallèles à la trace de surface des failles (de 150-200 m de long), afin d'obtenir une représentation en pseudo-3D de la subsurface (entre 2 et 10 m de profondeur). Nous avons également mesuré des MNT précis (GPS cinématique) des sites. L'analyse des données GPR à l'un des sites révèle, sur les profils perpendiculaires, de nombreux réflecteurs présentant des discontinuités à l'aplomb de la trace de surface de la faille, et donc vraisemblablement marquant la prolongation en profondeur de la faille. Ce premier résultat nous permet d'envisager la réalisation de tranchées paléosismologiques au site identifié. L'analyse de l'architecture pseudo-3D de la sub-surface pourrait par ailleurs révéler des marqueurs enfouis décalés par la faille. Si tel est le cas, la mesure de ces décalages pourrait nous permettre de quantifier les déplacements Quaternaires sur la faille analysée. Nous présenterons les résultats préliminaires de ce travail.

### 1.6.4 (o) Approche pluridisciplinaire pour la caractérisation de failles actives décrochantes lentes : L'exemple du Lac du Bourget (jonction Alpes - Jura méridional)

Camille De La Taille<sup>1,2</sup>, Christian Beck<sup>1</sup>, François Jouanne<sup>1</sup>, Christian Crouzet<sup>1</sup>, Hervé Jomard<sup>2</sup>, David Marsan<sup>1</sup>, Pascale Bascou<sup>1</sup>, Thomas Lebourg<sup>3</sup>, Koen De Rycker<sup>4</sup>, Maarten Van Daele<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ISterre, Le Bourget du Lac

<sup>2</sup>IRSN, Fontenay-aux-Roses

<sup>3</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>4</sup>Renard center of marine geology, Ghent University, Gent, Belgique

Dans le Jura méridional, les failles décrochantes du Vuache, de Culoz et du Col du Chat compensent la différence de prisme tectonique à faible coefficient de friction basal au nord et à fort coefficient de friction basal au sud. Néanmoins des indices suggèrent un enracinement crustal de ces failles. Nous présentons ici une double approche : (1) la détection des microséismes sur ces failles et le retraitement de profils pétroliers pour préciser leur enracinement de ces failles et (2) l'enregistrement de

la déformation par la sédimentation récente.

Ainsi l'examen de la microsismicité et de la sismicité historique, en particulier le séisme du 18 février 1822 au nord du Lac du Bourget, indique un enracinement crustal probable de la faille de Culoz. Un réseau temporaire a été déployé en 2013-2014 et a permis l'enregistrement d'une crise sismique en Mars 2014. Les données recueillies permettent un éclairage complémentaire de la connaissance du système de la faille de Culoz.

Les profils sismiques à haute résolution réalisés en 2013 dans le Lac du Bourget, montrent que la signature sismique des failles de Culoz et du Col du Chat est caractéristique des décrochements. Des fractures de Riedel (R et R') sont visibles dans les sédiments lacustres les plus récents. Les failles de Culoz et du Col du Chat affectent tout le remplissage lacustre jusqu'au drapé sédimentaire Holocène.

A terre, dans les plaines alluviales, des profils de tomographie de résistivité électrique ont permis de mettre en évidence des contrastes de résistivité interprétés comme la signature des failles étudiées dans les dépôts quaternaires. Nos résultats permettent de mieux contraindre la géométrie et la segmentation des failles étudiées et de proposer un scénario de l'activité quaternaire des segments de failles sur la base de l'âge des sédiments déformés.

### 1.6.5 (o) Local seismic exploration of the shallow structure of two major faults

Michel Dietrich<sup>1</sup>, Hayrullah Karabulut<sup>2</sup>, Tugçe Afacan Ergün<sup>2</sup>,  
 Alexandra Alvarado<sup>3</sup>, Stéphane Garambois<sup>1</sup>, Laurence Audin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>Boğaziçi University, Kandilli Observatory and Earthquake Research  
 Institute Çengelköy İstanbul, Turquie

<sup>3</sup>Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Équateur

We report results on the seismic imaging of two major faults : a segment of the North Anatolian Fault (NAF) which ruptured at « supershear » velocity during the Mw=7.4 Izmit earthquake of 17 August 1999 near Sarimese in Turkey, and the Rumipamba segment of the Pallatanga fault system suspected to be responsible for the major M 7.5 1797 Riobamba earthquake in Ecuador.

In Turkey, we implemented a 1.2 km long Vibroseis seismic reflection profile across the NAF near the village of Sarimese to characterize the shallow structure of the fault. Our main target at this location was the sediment/basement interface around the NAF with two specific goals : estimation of the sediment thickness in the studied area, and identification of possible differences (vertical offsets) between the two fault blocks in the hard rock basement. We also acquired data with specific acquisition geometries, notably by moving the vibrator along the fault zone to record possible fault-guided waves and estimate the average geometrical and mechanical properties of the fault gouge. Our results indicate that the fault zone near Sarimese is approximately 80 m wide, that it is characterized by a near-surface velocity drop of about 30% and by an increase in attenuation. In the 10-100 Hz frequency band used in our experiments, no fault-guided waves could be detected. This dataset was also exploited for seismic tomography using the first arrivals with two different algorithms : the one devised by Zelt and Barton (1998) and SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique).

The experiment recently carried out in Ecuador was more modest. In comparison with the 180+ inline vibration points used in Turkey, we used a total of ten 200 g shots in a seismic refraction configuration using 96 fixed geophones. The first images obtained by tomographic reconstruction with the SIRT algorithm show that the Pallatanga fault zone is rather narrow in the area investigated, where three trenches were excavated in 2010.

### 1.6.6 (o) Imagerie des failles récentes dans la région d'Al Hoceima : bathymétrie et sismique réflexion haute résolution

Manfred Lafosse<sup>1</sup>, Elia d'Acremont<sup>1</sup>, Alain Rabaute<sup>1</sup>, Bernard Mercier De Lépinay<sup>2</sup>, Christian Gorini<sup>1</sup>, Marc-André Gutscher<sup>3</sup>,  
 Abdelilah Tahayt<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>3</sup>LDO, Plouzané

<sup>4</sup>Université Mohammed V-Agdal, Département des Sciences de la Terre, Rabat, Maroc

La frontière de plaque Afrique-Eurasie reste très mal définie dans la mer d'Alboran. Elle est diffuse depuis la transformante de Gloria jusqu'à la frontière ouest Algérienne. Il est intéressant de caractériser l'état de contrainte et la déformation dans la zone sismiquement active d'Al Hoceima où la géométrie et la nature des failles actives sont encore mal définies. Pour cette étude, des profils de sismique réflexion acquis en 2012 durant les campagnes Marlboro et SARAS ainsi que des profils industriels disponibles, ont été combinés à une couverture bathymétrique haute résolution. Nous précisons le système de failles qui traversent le bassin de Nekor en mer, ainsi que le prolongement de la faille de Trougout et la localisation des failles de Bokkoya et Bousekkour-Aghbal.

En mer les zones de failles de Bousekkour-Aghbal et Bokkoya sont définies par des segments de failles en échelons normales-décrochants orientés NNE-SSO. Ces failles décalent le socle acoustique et le fond marin. Ces structures affectent les paléo-terrasses marines situées à -105m sous le niveau marin actuel et produisent des escarpements métriques. La faille de Trougout orientée N-S correspondant à la bordure Est du bassin de Nekor met en contact les dépôts Plio-Quaternaires et le domaine volcano-sédimentaire plus ancien de Ras Tarf. Ce segment offshore produit un décalage vertical du fond marin de 3m. Les dépôts Plio-Quaternaires y sont syn-tectoniques. Dans le bassin de Nekor des failles normales secondaires orientées N150° affectent le socle acoustique et pour certaines décalent le fond marin. Les positions successives des paléo-canyons pointés sur les lignes sismiques montrent une migration de la subsidence d'Est en Ouest, contrôlée par ces failles. Au large du Cap de Ras Tarf, des failles normales N150° sont visibles à l'affleurement mais ne semblent pas actives. Ces structures tectoniques fonctionnent en bassin transtensif senestre connectant les failles d'Al Idrisi au Nord à la faille de Nekor au Sud.

### 1.6.7 (p) Apport de l'imagerie haute résolution PLEIADES pour l'étude des failles actives, exemple de la Faille de Longriba, Est Tibet

Claire Ansberque<sup>1</sup>, Olivier Bellier<sup>1</sup>, Vincent Godard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

L'imagerie de haute résolution qui a fortement évolué au cours de ces deux dernières décennies, offre la possibilité d'observer et de quantifier en détail des objets géologiques de tailles centimétriques à métriques. Son utilisation s'avère de plus en plus systématique dans le domaine de la tectonique active et de la géomorphologie quantitative. Nous avons donc tester l'apport de cette imagerie haute résolution dans l'analyse de zones de failles actives décrochantes en contexte de faible taux de déplacement. Pour se faire nous avons utilisé des images Pléiades qui avec une résolution de 50 cm en panchromatique, semblent être un outil de choix pour la cartographie de la segmentation des failles actives et pour la quantification de leur déplacements verticaux et horizontaux. Nous proposons une étude préliminaire d'utilisation de couples d'images Pléiades sur la Faille de Longriba (FL, Est Tibet). A l'aide

de ces couples d'images nous avons réalisé des Modèles Numériques d'Élévation (MNE) relatifs (sans points de contrôle au sol) de 2 à 5 m de résolution horizontale. La FL est un système constitué de deux zones de failles dextres et parallèles : Longriquo et Maoergai, de longueur respective de 80 et 120 km, orientées NW-SE. La FL accommode une vitesse horizontale d'environ 2 mm/an à l'Holocène. Les faibles vitesses de déplacements sur la FL et les caractéristiques du terrain (climat, lithologie) rendent le travail d'identification de la segmentation délicat avec une imagerie de basse résolution de type SRTM 90m, ASTER 30m. L'utilisation des couples d'images Pléiades s'avère donc justifiée puisqu'en plus de faciliter la cartographie de la segmentation, elle nous a apporté des informations sur la géométrie et la cinématique des deux zones de failles. De plus, nous avons pu mesurer des décalages de marqueurs morphologiques de l'ordre de la dizaine de mètres ce qui n'était pas envisageable avec des images de basse résolution.

### 1.6.8 (p) Contribution des données gravimétriques et magnétiques a l'étude structurale du nord-ouest de l'Algérie

Amar Bourmatte<sup>1</sup>, Mouloud Idres<sup>1</sup>, Saddek Samai<sup>1</sup>, Ahmed Ydri<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de géophysique- Faculté des sciences de la terre, géographie et aménagement du territoire, Alger, Algérie

La région d'étude est située au Nord-Ouest de l'Algérie. On distingue, du Nord au Sud, l'Atlas Tellien, les Hautes Plaines et l'Atlas Saharien. Cette région appartient à l'orogénèse alpine.

L'Atlas Tellien est formé du Tell septentrional, d'affinité interne, et constitué des massifs littoraux (socle cristallin, Paléozoïque non métamorphique ou chaîne calcaire) et du Tell méridional d'affinité externe qui regroupe l'autochtone à schistosité de l'Oranie, du Chéelif, du Dahra et l'autochtone intra-tellien de l'Ouarsenis.

Les Hauts Plateaux sont une zone autochtone appelée l'autochtone sud tellien. C'est aussi l'avant pays de la chaîne alpine d'Algérie, constitué par la Meseta oranais.

L'Atlas Saharien est séparé des Hauts Plateaux par des failles en échelon qui se suivent d'Ouest en Est formant l'Accident Nord Atlasique (ANA). Ce dernier n'est pas aussi caractéristique que l'Accident Sud Atlasique (ASA) qui sépare le domaine alpin de la plateforme saharienne.

Sur le plan tectonique, les structures plissées sont intensivement affectées par des failles d'orientation SW-NE et SE-NW qui ont conditionné le compartimentage, à forte amplitude verticale, des structures. Les ensembles géologiques de l'Oranie se sont structurés au cours des périodes alpine, néogène et quaternaire. Les failles actives, connues, affectent surtout les bassins post-nappes localisés en milieu continental et le bassin de la mer d'Alboran.

L'objectif de notre travail est d'interpréter les données gravimétriques et magnétiques en utilisant différents traitements numériques. Les cartes des dérivées orientées et du gradient total nous ont permis de localiser les accidents majeurs. Les méthodes d'Euler et du tilt angle, appliquées à la carte de l'anomalie magnétique réduite au pôle, nous ont donné des indications supplémentaires sur la profondeur des structures responsables de ces accidents.

### 1.6.9 (p) Déformations et failles actives dans le prisme Calabrais et sur la marge Est-Sicilienne : nouvelles données bathymétriques et sismique réflexion HR de la campagne CIRCEE\_HR

Lucie Legendre<sup>1</sup>, Marc-André Gutscher<sup>1</sup>, David Graindorge<sup>1</sup>, Bernard Mercier De Lépinay<sup>2</sup>, Laurine San Pedro<sup>1</sup>, Stéphane Dominguez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LDO, Plouzané

<sup>2</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>3</sup>Géosciences Montpellier

Le Sud de l'Italie a été façonné depuis la fin du Miocène par la subduction du slab Ionien sous la Calabre et l'ouverture arrière-arc du bassin SE Tyrrhénien. Cependant l'activité récente et actuelle de cette subduction et des failles à l'Est de la Sicile demeure discutée. L'un des objectifs principaux de la campagne CIRCEE\_HR (oct 2013, N/O Le Suroit) était de chercher des traces de déformation active dans le prisme d'accrétion calabrais et dans la mer Ionienne par la cartographie bathymétrique et l'acquisition de profils de sismique réflexion haute résolution (HR).

Ainsi trois structures majeures sont identifiées dans l'arc Calabrais présentant différents degrés d'activité : l'escarpement de Malte, le front de déformation du prisme d'accrétion calabrais et l'emprunte en surface d'une faille verticale lithosphérique de type STEP (Subduction Tear Edge Propagator). La faille située au pied de l'escarpement de Malte n'est active que dans sa partie Nord où elle présente un jeu normal visible sur les données sismiques. Ces mêmes données et le CHIRP révèlent également que le front de déformation du prisme d'accrétion calabrais s'organise en plis anticlinaux associés à des failles chevauchantes ancrées dans l'unité supérieure Messinienne se propageant jusque dans les sédiments les plus récents. Sur la partie SW du prisme d'accrétion, se situe un bassin syn-tectonique allongé avec une épaisseur de 500-800 m, à remplissage Pléistocène contrôlé par une ou deux failles normales sur sa bordure Ouest et qui serait l'expression de surface possible d'une STEP. Plus au Nord la cinématique devient principalement décrochante dextre, caractérisée par des bassins en échelons et des failles resserrées.

Nos interprétations sont cohérentes avec la cinématique régionale déterminée à partir des observations GPS et soutiennent l'hypothèse d'une activité persistante avec une convergence très lente (~ 5mm/a) du prisme d'accrétion calabrais.

### 1.6.10 (p) Terrestrial LiDAR scanning and close-range photogrammetry of active normal fault scarps in Italy and Greece

Magali Rizza<sup>1</sup>, Jim Tesson<sup>1</sup>, Lucilla Benedetti<sup>1</sup>, Céline Hecquet<sup>2</sup>, Jules Fleury<sup>1</sup>, Olivier Bellier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>Plate-forme d'imagerie PRATIM, Aix-Marseille Université

Fault surface roughness is often used to understand the factors controlling seismic ruptures and related slips. Surface roughness also originates, however, from weathering processes occurring once the fault plane is exhumed. Here we aim to study in detail the morphology of seismically exhumed normal fault scarps to constrain the fault slip history. Using a terrestrial laser scanning (TLS, ILRIS-3D) and close-range photogrammetry, the morphology of two well-preserved seismically exhumed normal fault scarps has been surveyed with a resolution of few millimeters. The two chosen sites, the Sparta and the Pizzalto faults, are located in Greece and in Italy, respectively. Their seismic slip histories have been retrieved using <sup>36</sup>Cl cosmogenic dating. The Sparta fault has ruptured at least 5 times over the last 13 kyr, with associated coseismic displacement of at most 1-2 m (Benedetti et al., 2002), while the Pizzalto fault has ruptured during at least 6 seismic events over the past 1-2 kyr, with associated displacement of at most 0.5-1.0 m (Tesson et al., RST 2014). Both faults thus display clear evidences of successive and distinct exhumation events that might be distinguishable on the small-scale morphology of their fault plane.

The principal objective of this study is thus to highlight the morphological characteristics resulting from both coseismic displacements and weathering processes using high resolution DEMs and correlate those

observations with the 36Cl discontinuities associated with the past seismic events. We are testing different approaches to identify at different scales surface irregularities, fault striae, curvature and surface roughness produced by the combination of repetitive slips during earthquakes and weathering processes once the fault plane has been seismically exhumed.

## 1.7 Aléa et risques naturels (CNFGG)

### Responsables :

- José Darrozes (GET, Toulouse)  
jose.darrozes@get.obs-mip.fr
- Olivier Bellier (CEREGE, Aix-en-Provence)  
bellier@cerege.fr
- Evelyne Foerster (CEA, Gif sur Yvette)  
evelyne.foerster@cea.fr

### Résumé :

La Terre, depuis ces enveloppes externes (atmosphère, hydrosphère) jusque dans ces enveloppes internes est soumise à des instabilités perpétuelles. Celles-ci initient de nombreux aléas naturels qui lorsqu'ils sont associés à une vulnérabilité donnent des risques naturels plus ou moins catastrophiques : inondations, séismes, éruptions volcaniques, tsunamis, mobilité littorale, mouvements gravitaires (effondrements de falaises, glissements de terrain, chutes de blocs,...), etc.

Les études sur les risques naturels se sont particulièrement développées depuis les années 80. Avec l'évolution et les progrès techniques de nombreuses communautés (géosciences, géographie, sociologie, économie) travaillent conjointement sur ces thématiques. Nous proposons donc à ces diverses communautés de discuter des récentes avancées sur les risques naturels. L'accent sera mis sur :

- les études « multi-méthodes » alliant mesures in situ (GPS, extensomètres, inclinomètres, GBSAR, topographie haute résolution, géophysique de sub-surface,...), mesures satellites (optiques, InSAR, altimétriques, Lidar,...) afin d'obtenir une meilleure caractérisation des aléas et des vulnérabilités.
- les évolutions dans le domaine de l'observation, la modélisation, la prévision et la prévention ainsi que la surveillance.
- les études « multi-communautés » visant à mieux prévenir et gérer les risques naturels, les expériences nationales et internationales.
- l'influence des changements climatiques sur les risques naturels.

### 1.7.1 (o) Late Pleistocene tectonic activity of the eastern border of the San Rafael block (Neuquén Basin, Argentina)

Matthieu Branellec<sup>1</sup>, Grégoire Messenger<sup>2</sup>, Bertrand Nivière<sup>1</sup>, Vincent Regard<sup>3</sup>, Jean-Paul Callot<sup>1</sup>, Jean-Claude Ringenbach<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau

<sup>2</sup>Statoil ASA Carbonates Group Research Center Sandsliveien, Bergen, Norvège

<sup>3</sup>GET, Toulouse

<sup>4</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

We focus here on the late Pleistocene tectonic activity of the eastern border of the San Rafael block in the northern foreland of the Malargue fold and thrust belt (Argentina). Located >100 km from the thin-skinned deformation front, the San Rafael block exhibits only low to moderate magnitude local earthquakes.

Above the thin-skinned deformation front in Sosneado, we retrieved a surface rupture in a late Pleistocene fan. The <1m reverse offset is in continuity of a topographic ridge more than 30km-long and 100m high. Where the Atuel River cross cuts it, remnant terraces are uplifted and folded. The ridge is correlated in depth on seismic profiles with the Sosneado thrust.

Farther east, the eastern topographic front of the San Rafael block also exhibits clear morphologic evidences of Pleistocene deformations. South of San Rafael, the Cerro Negro lava flow (0.801±/− 0.049 Ma in 38Ar-36Ar age) is folded above the Cerro Negro thrust (Folguera et al., 2009). We show that a younger remnant terrace is also deformed.

Additionally in the suburbs of San Rafael, a Pleistocene fan is folded and offsets the river that feed it. Farther north, a clear 30 m high and few kilometres long scarp in remnant terraces could be interpreted as fault scarps.

These morphologic offsets may have been presumably triggered by significant seismic events of larger sizes than those instrumentally recorded for the same region. They are located in the epicentral area of strong historical earthquakes. This framework suggests that the evaluation of the seismic hazard should not be underestimated in the Neuquén territory.

### 1.7.2 (o) Interaction canyon messinien et faille de Nîmes dans le secteur du bassin de Pujaut : apport quant à l'évaluation des aléas locaux/régionaux

Walter Capella<sup>1,2</sup>, Olivier Bellier<sup>1,3</sup>, Jean-Claude Hippolyte<sup>1</sup>, Marc Cushing<sup>4</sup>, Doriane Delanghe-Sabatier<sup>1</sup>, Daniel Hermitte<sup>1</sup>, Jean-Claude Parisot<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>Paleomagnetic laboratory, Utrecht, Pays-Bas

<sup>3</sup>ECCOREV et Labex OT-Med A\*Midex, Aix-Marseille Université, Aix-en-Provence - France

<sup>4</sup>IRSN, Fontenay-aux-Roses

Cette étude résulte d'un projet initié lors d'une collaboration IRSN et CEREGE financé par la fédération ECCOREV, ayant pour objectif de mieux contraindre notre connaissance des canyons messiniens de la Durance et du Rhône, afin d'améliorer l'évaluation de l'aléa sismique régional et local du SE de la France. Nous présenterons les résultats acquis dans le bassin de Pujaut, lieu où le canyon messinien du Rhône est recoupé par la faille de Nîmes Cette étude basée sur une approche pluri-disciplinaire et multi-échelle combine analyse tectonique, cinématique de faille, morphostructurale, et imagerie géophysique (tomographie électrique, analyse sismologique- bruit de fond et H/V présentée par Bailly et al., 2014). Elle complète les travaux de Clauzon et al.

(2004) et Schlupp et al. (2001) sur la faille de Nîmes. L'analyse des déformations le long de la faille affectant le remplissage pliocène a permis de déterminer un état de contrainte en décrochement ( $\sigma_2$  vertical) transpressif qui impliquerait que la faille de Nîmes est senestre à composante inverse. La tomographie électrique nous a permis de localiser le tracé de la faille en sub-surface et quantifier la déformation post-Crise messinienne. Ainsi, les valeurs cumulées de la composante verticale inverse de 10 à 15 m. Cependant l'état de contrainte actuel reste une énigme ; la tranchée de Courthezon (Combes et al., 1993) montre clairement une cinématique en composante inverse post-Pleistocene ancien sur une faille satellite, au NE de la faille de Nîmes. Cependant, les mécanismes au foyer en faille normale des séismes (faibles magnitudes M : 3-4) suggèreraient un régime tectonique en extension dans la région de Pujaut-Avignon (Baroux et al., 2001). Ceci suggère que : 1- soit les mécanismes au foyer des « petits » séismes ne sont pas significatifs du régime tectonique régional actuel, 2- soit une inversion du régime tectonique s'est mise en place au quaternaire récent.

### 1.7.3 (o) Etude des caractéristiques du canyon messinien en Basse Vallée du Rhône : profil de vitesse, effets de site et aléa sismique

Thibaut Bailly<sup>1,2</sup>, Marc Cushing<sup>1</sup>, Fabrice Hollender<sup>3</sup>, Philippe Dussouillez<sup>4</sup>, Olivier Bellier<sup>4</sup>, Stéphane Nechtschein<sup>1</sup>, Céline Gélis<sup>1</sup>, Elise Delavaud<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IRSN, Fontenay-aux-Roses

<sup>2</sup>GEOTER Alpes/ FUGRO - Fugro group Technolac, Le Bourget du Lac

<sup>3</sup>CEA Cadarache, Saint Paul-lez-Durance

<sup>4</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

Plusieurs sites nucléaires étant localisés à l'aplomb de la paléo-vallée messinienne du Rhône, il est nécessaire de caractériser l'éventuelle amplification du mouvement sismique liée au piégeage local des ondes sismiques dans ce canyon et à son remplissage sédimentaire. Afin d'étudier ces effets de site, une approche possible consiste à 1) caractériser les fréquences fondamentales de résonance de ce canyon, 2) évaluer sa géométrie et le profil vertical de vitesses. La présente étude est centrée sur l'étang de Pujaut situé sur le paléo-cours messinien du Rhône. Ce cours N-S bifurque vers le sud-ouest au passage de la faille de Nîmes. Des investigations géophysiques ont été menées dans ce secteur pour évaluer la géométrie du canyon, son éventuel décalage par la faille de Nîmes, et pour caractériser les fréquences fondamentales de résonance et le profil de vitesse des ondes de cisaillement. Les mesures de bruit de fond (H/V) ont conduit à l'élaboration d'une carte en iso-valeurs de la profondeur d'une interface située autour de 500 m correspondant à la partie supérieure du remplissage du canyon. Les mesures en réseaux (déca à kilométriques) et un profil MASW ont permis d'obtenir la courbe de dispersion du mode fondamental des ondes de Rayleigh sur une gamme de fréquence allant de 0,6 à 33 Hz. Son inversion réalisée conjointement avec celle de la courbe d'ellipticité permet de proposer deux modèles de vitesses jusqu'à plus de 1000 m de profondeur. Aucun décalage de la paléo-topographie du canyon par la faille de Nîmes n'a pu être identifié à la résolution de l'étude. Ces résultats constituent une étape majeure vers la modélisation des éventuelles amplifications du mouvement sismique dont les résultats pourraient par la suite faire l'objet de comparaisons avec des mesures site/référence.

### 1.7.4 (o) A ~ 3000 years-old paleo-landslide and subsequent tsunami revealed by marine deposits east of Taiwan

Serge Lallemand<sup>1</sup>, Rémi Lehu<sup>1</sup>, Frédéric Bouchette<sup>1</sup>, Fabien Rétif<sup>1</sup>, Nathalie Babonneau<sup>2</sup>, Gueorgui Ratzov<sup>3</sup>, Shu-Kun Hsu<sup>4</sup>, Laurent

Dezileau<sup>1</sup>, Stéphane Dominguez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Géosciences Montpellier*

<sup>2</sup>*LDO, Plouzané*

<sup>3</sup>*IFREMER, Plouzané*

<sup>4</sup>*National Central University, Taoyuan, Taiwan*

Taiwan is a young and active mountain belt riding over two opposite-verging subduction zones. It can thus be potentially attacked by giant waves on both sides in response to large offshore earthquakes (up to M8) or landslides. We have discovered sedimentological records in a marine core attesting that a major tsunami triggered by a submarine landslide occurred about 3,000 years ago. The core is located about 20 km offshore the Coastal Range, at the top of a submarine high culminating at a depth of 1200 meters below the sea-level. That high overhangs canyons and valleys flooring more than 1000 meters deeper so that no hyperpycnal flow can reach the sampling site. The 4 meters long core consists mainly of a monotonous sequence of olive-grey clay hemipelagites. Unexpectedly, we have observed a 23 cm -thick anomalous sequence, 3.2 meters below the seafloor, characterized from the base to the top by fine silts in the first 18 cm topped by shells and wood debris in the upper 5 cm. We interpret this anomalous sequence as the deposit of a terrigenous plume shortly followed by decantation of shore biogenic material. This succession strongly suggests that a submarine landslide was responsible for both the silty plume and the subsequent tsunami that washed the shoreline. After transport by currents, the suspended material, composed of pluri-millimetric shells and wood debris, sank. Based on trench excavations on a 18 meters-high nearby coastal terrace, 3 marine invasions were observed during the past 3,000 years. Since only the oldest one is recorded in the marine core, it means that the tsunami at the origin of the final anomalous deposit was characterized by wave heights significantly larger than 18 m. Hydrodynamical simulations were performed to estimate the minimum volume and the range of possible locations of the slumped mass that triggered the tsunami. In addition, morpho-sedimentary analysis of the incised slope offshore the east coast allow us to propose candidate sites for recent submarine landslides. Finally, our observations on a single core demonstrate that at least one major tsunami has been triggered by a submarine landslide about 3,000 years ago. Given the high level of tectonic activity in that sector, tsunami hazard must be seriously considered along the east coast of Taiwan.

### 1.7.5 (o) Scénarios de séismes en champ proche et tsunamis induits sur la Riviera Franco-Italienne (Méditerranée occidentale) (résultats du projet ASTARTE, CE-FP7)

Christophe Larroque<sup>1</sup>, Mansour Ioualalen<sup>1</sup>, Oona Scotti<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*GEOAZUR, Sophia Antipolis*

<sup>2</sup>*IRSN, Fontenay-aux-Roses*

Le système de failles inverses actives récemment mis en évidence au pied de la marge nord-Ligure accommode l'inversion de la marge depuis le Messinien (5 Ma). En profondeur ces failles se connectent certainement à un chevauchement à faible pendage nord. L'évènement régional majeur, le séisme Ligure du 23/02/1887 (Mw 6.7-6.9) et le tsunami associé, pourrait résulter de l'activation d'une partie de ce chevauchement. A partir des caractéristiques de la source du séisme Ligure, nous avons construit un ensemble exhaustif de scénarios impliquant tout ou partie des 80 km du système de failles actives. Deux scénarios correspondent respectivement à la rupture des segments est (au large d'Imperia) et ouest (au large de Nice) du chevauchement Ligure. Afin d'analyser de façon complète les potentialités, nous avons aussi testé un second groupe de scénarios correspondant à la rupture de la totalité des

80 km du système de failles. Pour tous ces scénarios, nous avons simulé l'impact sur la côte des tsunamis induits. Nous produisons des cartes de distribution des hauteurs maximum de vagues et nous discutons les processus responsables de la localisation de ces maximums. Les simulations suggèrent que l'impact des vagues est principalement local, ce qui est cohérent avec la taille modérée du plan de rupture. Les scénarios analysés montrent que pour de tels événements, certaines localités (San Remo, Cipressa, Imperia, Diano Marina, Nice) peuvent subir des vagues importantes dans un intervalle de 3 à 10 m (en fonction du glissement co-sismique et donc de la magnitude) et en relation avec la faible profondeur de l'hypocentre (15 km). Ces travaux permettent de souligner que sur la Riviera Franco-Italienne, si l'aléa tsunami est localisé et modéré en comparaison des grandes zones de subduction, le risque est néanmoins significatif car le temps d'arrivée des vagues déclenchées par un séisme proche n'est que de quelques minutes et les systèmes de détection actuels ne permettent pas une analyse et une alerte aussi rapide.

### 1.7.6 (o) Probabilistic landslide hazard mapping integrating climate change tendencies : case study of the Pays d'Auge plateau (Normandy, France)

Mathieu Fressard<sup>1</sup>, Yannick Thierry<sup>1,2</sup>, Olivier Maquaire<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*LETG, Caen*

<sup>2</sup>*Euro engineering, Hélio parc Pau*

A probabilistic model for landslide hazard assessment integrating climate change tendencies is presented for the Pays d'Auge plateau (Normandy). The model is based on the assessment and combination of the three key parameters of landslide hazard analysis : (1) landslide susceptibility mapping ; (2) landslide magnitude probability and (3) landslide temporal occurrence probability. For this study, the landslide occurrence probability was calculated based on historical rainfall data and two high resolution climate prospective scenarios proposed by the SCAMPEI research project.

A multivariate rare events logistic regression with replication model was selected to map the landslide susceptibility. The source area of the existing landslides was used as dependent variable, and slope angle, aspect, lithology and land use were used as independent variables. The estimated landslide volume was used as proxy of the magnitude probability assessment. The probability of landslide size was estimated as frequency percentage of landslide size and the percentage values were then expressed as probability. An intensity duration analysis on 30 years historical records has permitted indentifying a triggering threshold for the shallow landslides. The results show that precipitations episodes of more than 15 consecutive days with a mean intensity of 5mm/day are necessary to trigger landslides.

The temporal probability of landslides occurrence was estimated using the exceedance probability of the rainfall threshold required to trigger landslides using a Poisson distribution model. To integrate the general tendencies of climate change proposed by the GIEC for the next 30 years, the high resolution simulated rainfall data provided by the SCAMPEI research project we used.

Three landslide hazard maps were proposed for a one year return period taking into account prospective scenarios. The results show a large increase of the triggering event occurrence probability for both prospective scenarios.

### 1.7.7 (o) Analyse spatio-temporelle de la dynamique du glissement de La Clapière par une approche multi-paramètres

Edouard Palis<sup>1</sup>, Thomas Lebourg<sup>1</sup>, Maurin Vidal<sup>1</sup>, Emmanuel Tric<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

Depuis une vingtaine d'année d'études sur les mouvements de terrain, nous nous sommes rendu compte du rôle et des interactions subtiles qui existaient entre la complexité structurale, la dynamique des masses et la circulation interne complexe des fluides. Le mouvement de terrain de type DSL (Deep-Seated Landslide) de La Clapière est aujourd'hui très bien connu par la communauté scientifiques (volume, impact, enjeux, observations...), mais cette masse de savoir, n'a pas encore été compilée, ni même regardée à travers une analyse couplées de ses variabilités spatiales et temporelles. (Follacci, 1987 ; Julian et Anthony, 1996 ; Cappa et al., 2004, Bigot-Cormier et al., 2005 ; Lebourg et al., 2005 ; Jomard, 2006 ; Binet et al., 2007 ; El Bedoui 2009 ; Lebourg et al. 2011). Depuis 2007, une volonté de mutualisation et d'accès à des données uniformes a été mise en place par l'Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versant (OMIV, du Service National d'Observation français (SNO)). Cet observatoire (avec les laboratoires associés) a permis l'installation de stations de mesure permanentes et autonomes : GPS, météorologie, sismologie, chimie des eaux de sources. Depuis maintenant deux ans, un dispositif permanent de tomographie électrique est installé au bas du versant pour compléter le système de surveillance actuel et permettre d'avoir une vision plus profonde des variations physico-chimiques dans le massif. L'analyse de ces données permet d'observer différents régimes dynamiques, ainsi que des réponses aux facteurs externes de plusieurs natures : instantanées, différées, variabilités à long terme. L'objectif de cette étude de synthèse est d'analyser l'évolution temporelle et spatiale de la résistivité électrique, du déplacement et des hydrométéores pendant une année (novembre 2012 à novembre 2013). C'est ainsi qu'une approche qualitative et statistique par clusters, analyse en composante principale (ACP), et pseudo-3D temporel de ces variables a été mis en place. Cette nouvelle étude statistique explique aussi le rôle majeur de la faille et de la base du glissement, ainsi que la chronologie du flux d'eau dans le massif, permettant une meilleure compréhension de la dynamique complexe et inégale dans le temps de cette zone.

### 1.7.8 (o) Fluctuating explosive dynamics of the crater-lake Pavin volcanic eruption, Auvergne, France

Hervé Leyrit<sup>1</sup>, William Zylberman<sup>1</sup>, Alexis Jaillard<sup>1</sup>, Pierre Lavina<sup>2</sup>,  
Pascale Lutz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais

<sup>2</sup>Terre et Volcans, Saint-Dier d'Auvergne

The crater-lake Pavin, located in Auvergne and dated 6700 years BP, is the youngest volcano and one of the two acidic maars in metropolitan France. Field missions to the Pavin area were conducted for the past five years, leading to a better understanding of the Pavin tephrostratigraphy and geological history. Based on field textures, componentry and SEM morphoscopy of juvenile ash particles, a new complete tephrostratigraphy of the Pavin volcanic deposit is defined. The 26 tephra beds and bed sets corresponds to 4 volcanic units. The deposits are composed of high energy basal surges, lapilli fall and mixed dynamisms. The vertical variations of the maar deposits provide a way to access the fluctuating eruptive conditions related to changing magma-water interactions of the 4 main phases. The changes are associated to simultaneous variations of three factors : the pulsating mass eruption rates, the depth of fragmentation and the aquifer yield. Fluctuating explosive dynamics during the eruption must be integrated in risk assessment.

### 1.7.9 (o) Etude historique des crues du Rhône et leurs conséquences dans l'évolution de l'occupation des sols : le cas du territoire de Vienne (Isère)

Gwenaél Jouannic<sup>1</sup>, Julien Gargani<sup>2</sup>, Zéhir Kolli<sup>1</sup>, Clément Judek<sup>1</sup>,  
Tiffany Legendre<sup>1</sup>, Philippe Gastaud<sup>1</sup>, Denis Crozier<sup>3</sup>, David  
Nicogossian<sup>4</sup>, Fabrice Arki<sup>1</sup>, Matew Niang<sup>1</sup>, Adrien Varcin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEREMA, Tomblaine

<sup>2</sup>IDES, Orsay

<sup>3</sup>CEREMA, Nantes

<sup>4</sup>CEREMA, Isle d'Abeau

Les aménagements du 20<sup>ème</sup> siècle, suivis d'une longue période sans crue, ont entretenu l'illusion d'un Rhône « domestiqué ». Cette artificialisation a modifié les pratiques des populations riveraines : l'urbanisation s'est développée, l'agriculture a investi des terrains autrefois occupés par des zones naturelles alluviales. Aujourd'hui, les aménagements introduisent souvent une séparation physique avec le fleuve qui s'écoule dorénavant derrière des digues. Les sociétés locales ont oublié le risque inondation.

La politique publique de prévention des risques ne permet pas aujourd'hui d'aboutir à une réduction du coût des dommages en cas de crue. Les pouvoirs publics ont identifié la nécessité de construire une nouvelle approche en matière de réduction de vulnérabilité et ont incité les scientifiques, à innover en matière de réduction de vulnérabilité et de résilience des territoires.

L'objet de ce travail a été d'étudier un territoire situé le long du fleuve Rhône par 3 approches parallèles :

- l'histoire des crues ayant touché le fleuve depuis les dernières décennies ;
- l'évolution de l'occupation des sols des berges du fleuve et le développement de l'urbanisation ;
- l'évaluation économique des dommages sur plusieurs scénarios de crues sur l'état actuel du territoire.

L'utilisation d'anciens plans cadastraux, de photos aériennes et satellites historiques a permis de comparer avec les bases de données actuelles l'urbanisation des bords du Rhône en zone inondable. Un zoom particulier a été réalisé sur le territoire de Vienne qui a fait l'objet d'un arrêté préfectoral en tant que Territoire à Risque Important d'inondation (TRI) en 2013.

Ce travail vise à renseigner l'historique de l'urbanisation des zones inondables par rapport aux grandes crues du Rhône. Cette étude devra permettre de discuter et mieux comprendre l'évolution historique de l'urbanisation des berges du Rhône qui a amené à l'état actuel de l'occupation des sols et à la construction en zone inondable.

### 1.7.10 (o) Caractérisation de l'aléa « effondrement karstique » dans le Val d'Orléans (Loiret) et risque d'instabilité des digues de la Loire

Philippe Gombert<sup>1</sup>, Marine Bouzeman<sup>1</sup>, Marwan Al Heib<sup>1</sup>, Olivier  
Deck<sup>2</sup>, Rafid Alboresha<sup>2</sup>, David Mathon<sup>3</sup>

<sup>1</sup>INERIS, Verneuil-en-Halatte

<sup>2</sup>Ecole des mines de Nancy, Nancy

<sup>3</sup>CEREMA, Blois

La vallée de la Loire est protégée contre les inondations par 650 km de digues reposant sur plusieurs mètres d'alluvions. Leur substratum est localement karstique, comme dans le Val d'Orléans (calcaires de Beauce). Dans ce secteur, 35 tronçons de digues se sont rompus lors des crues,

entraînant des inondations catastrophiques. Parmi les aléas de rupture de digues, la récente étude de dangers a identifié l'aléa « effondrement karstique » sans toutefois pouvoir le caractériser. En France, la Loire est d'ailleurs le premier cours d'eau pour lequel une demande de caractérisation de cet aléa a été formulée alors que les terrains potentiellement karstifiables intéressent 30% du territoire (notamment les bassins Seine-Normandie, Artois-Picardie et Rhône-Méditerranée et Corse).

Dans le Val d'Orléans, parmi les 580 fontis répertoriés, certains ont affecté des digues mais aussi des infrastructures routières ou des bâtiments. On soupçonne le rôle du karst dans l'apparition de certains d'entre eux ainsi que dans d'autres types de désordres survenus aux digues (abaissement de la ligne de crête). Les mécanismes invoqués sont tantôt un effondrement brutal (effondrement du toit d'une cavité karstique, débouillage d'un conduit subvertical), tantôt un affaissement lent (suffosion).

Le travail présenté porte sur l'analyse statistique des fontis en vue de la caractérisation des aléas « effondrement karstique » et « affaissement karstique » en termes d'intensité et de probabilité. L'intensité a été reliée au diamètre des fontis ainsi qu'à leur profondeur mais la probabilité n'a pas pu être quantifiée du fait du peu de recensements au cours du temps. Elle a donc été remplacée par la prédisposition des terrains à l'apparition de fontis. Plusieurs paramètres de prédisposition ont alors été étudiés : distance à la Loire, épaisseur d'alluvions, nature des alluvions, présence de fontis proches, etc. Les résultats montrent que tous ces paramètres semblent avoir une influence plus ou moins forte sur l'occurrence des fontis.

### 1.7.11 (o) L'histoire des submersions marines récentes du littoral charentais révélée par les enregistrements sédimentaires et les archives historiques

Eric Chaumillon<sup>1</sup>, Jean-Luc Schneider<sup>2</sup>, Guillaume Couppey<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LIENSs, La Rochelle

<sup>2</sup>EPOC, Talence

Les submersions marines sont des aléas naturels qui affectent de nombreuses régions côtières du monde et leur recrudescence est susceptible d'accompagner le changement climatique. En France, la partie centrale du Golfe de Gascogne (Poitou-Charentes, Vendée et Gironde) est la plus vulnérable aux submersions avec 45 à 50 % de la bande côtière large de 10 km située sous le niveau des pleines mers de vives eaux. L'analyse rétrospective, pour préciser la récurrence des submersions dans cette zone au cours des 5 derniers siècles, est basée sur l'étude des archives sédimentaires et historiques. Des niveaux sédimentaires attribués à des submersions ont été étudiés dans 11 carottes (50 à 470 cm) prélevées dans trois marais côtiers charentais inondés lors des tempêtes Martin (1999) et Xynthia (2010). Le remplissage argilo-silteux des marais littoraux est entrecoupé de niveaux (mm à cm) silto-sableux qui renferment des foraminifères benthiques et des diatomées d'origine littorale attestant d'invasions marines. Des anomalies géochimiques (brome et chlore, XRF) dans certains intervalles argileux enrichis en organismes marins témoignent également des submersions. L'enregistrement sédimentaire des submersions s'exprime par plusieurs critères à proximité des cordons sableux littoraux. Ailleurs, ils sont incomplets et parfois limités aux seules anomalies géochimiques (submersion sans apports importants de sédiment). Les données du 210Pb (marais d'Yves) permettent d'estimer l'âge des niveaux de submersion identifiés et permettent de tenter des corrélations avec les données des archives historiques. L'ensemble des submersions reportées par ces archives n'est pas identifié sur les enregistrements sédimentaires. Ainsi, tant les archives historiques que les enregistrements sédimentaires présentent des lacunes et des biais et des approches pluridisciplinaires sont indispensables pour progresser dans ces recherches.

### 1.7.12 (p) Preparedness and prevention actions for the seismic risk mitigation in Martinique (FWI) : how can they be improved ?

Jean-Christophe Audru<sup>1</sup>, Jean-Louis Vernier<sup>2</sup>, Bruno Capdeville<sup>2</sup>,  
Jean-Jacques Salindre<sup>2</sup>, Eliane Mouly<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BRGM Martinique

<sup>2</sup>DEAL Martinique, Martinique

In 2006, Martinican stakeholders involved in seismic safety formed the « Réplik » working group (« Aftershock » in French), the first of its kind in this region. This poster presents a mid-term appraisal of the first seismic awareness campaign organized by Réplik from 2006 to 2011, and how it has modified, or not, local preparedness. Despite efforts from the Réplik team to improve its efficiency through surveys, a growing gap is noted between the observed awareness and the actual preparedness of the public. As observed elsewhere, gender, age, educational level, then boredom and saturation contribute to this discrepancy ; strong cultural items probably also influence the perception of actions. To remain efficient, to respond to security standards and to public's expectations, Réplik must evolve : consideration of religion and local beliefs, comprehensive messages on TV and radio, use of Creole language, participatory experiences and drills, with a little bit of science. So that, the Réplik campaign can hope to increase Martinicans' involvement into the preparedness process.

### 1.7.13 (p) Séisme de Vannes (Morbihan) du 21 novembre 2013

Bruno Hernandez<sup>1</sup>, Jean-Paul Sautoire<sup>1</sup>, Laurent Bollinger<sup>1</sup>, Yoann Cano<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LDG, CEA, Arpajon

Le tremblement de terre breton, qui s'est produit le 21 novembre 2013 à 09 h 53 TU, de magnitude 4,6 (magnitude locale déterminée par le Laboratoire de Détection et de Géophysique) se localise dans le département du Morbihan à proximité de la ville de Vannes. La profondeur focale de ce séisme estimée à partir des données régionales est de 4 km. L'incertitude associée à cette estimation de profondeur est élevée. La profondeur de l'hypocentre de ce tremblement de terre a pu être déterminée plus précisément par la détermination des temps d'arrivées des phases sismiques de profondeur pP et sP à distance télésismique. L'inversion du mécanisme au foyer de ce séisme en utilisant les formes d'ondes des stations sismologiques les plus proches localisées en Bretagne et en Pays de Loire montre un mécanisme en décrochement pur. La sismicité de la Bretagne est modérée, comparée à d'autres régions comme les Alpes ou les Pyrénées. En revanche, le Massif armoricain est plus actif que les bassins qui le bordent (Bassin Aquitain, Bassin Parisien). De nombreux séismes se produisent chaque année dans ce massif à proximité du Cisaillement Sud-Armoricain. Le séisme du 21 novembre 2013, vu sa localisation et la direction d'un des deux plans du mécanisme au foyer d'azimut Nord Ouest - Sud Est, est cohérent avec la réactivation d'un segment du Cisaillement Sud Armoricaïn. Contrairement aux autres séismes Bretons notables de la période instrumentale dont la profondeur est généralement estimée entre 10 et 17 km (Hennebont, 2002 ; Brest, 2013) et dont la rupture peut être interprétée comme des relâchements de contraintes à la transition fragile/ductile de la croûte, le séisme du 21 novembre 2013 semble beaucoup plus superficiel et pourrait attester d'une sismicité bretonne localement moins profonde en particulier au niveau du golfe du Morbihan.

### 1.7.14 (p) First estimate of M>6.5 earthquakes records in marine sedimentary archives off East Taiwan during the last 2,000 years

Rémi Lehu<sup>1</sup>, Serge Lallemand<sup>1</sup>, Shu-Kun Hsu<sup>2</sup>, Laurent Dezileau<sup>1</sup>,  
 Nathalie Babonneau<sup>3</sup>, Gueorgui Ratzov<sup>4</sup>, Andrew T. Lin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier

<sup>2</sup>Department of Earth Sciences, Zhongli City, Taiwan

<sup>3</sup>IUEM, Plouzané

<sup>4</sup>IFREMER, Plouzané

Large earthquakes are one of the main driving mechanisms for turbidity current generation along active margins. When the turbidite sequences as well as the trigger mechanisms are well defined among the sedimentary archives, it is possible to use turbidites records as a proxy for paleoseismicity investigation. The Taiwan area, where the Philippine Sea Plate collides with the Eurasian plate at a convergence rate of 80mm/yr, is one of the most seismically active areas in the world and has been consequently struck repeatedly by destructive earthquakes. To better constrain the recurrence intervals of large earthquakes, we have conducted two cruises in 2012 and 2013 during which piston cores (up to 4m long) and box-cores were retrieved in tectonically controlled basin. We aimed at deciphering turbidite units and hemipelagic sequences with special attention to the source of the turbidites such as river discharges or slope sediments destabilized by earthquakes. From these cores we analyzed each event using several physical, chemical and sedimentological proxies. Moreover fine details of vertical elemental distribution acquired by X-ray fluorescence (XRF) scanning allow us to accurately identify and characterize turbidite events. Analyzing two cores in the Ryukyu forearc, we have identified 23 beds that differ from pelagic sediments and interpreted as resulting from slope instabilities. In the Luzon volcanic arc area, two cores were used to identify 25 layers. 14C dating performed on planktonic foraminifera and 210Pb-137Cs datings, provide a 2,000-years-long chronology of seismic events. Precise dating, of the three most recent sedimentary layers of one box-core (36cm long), based on 210Pb-137Cs and 137Cs chronology provides ages of 2002 ± 3 AD, 1953 ± 4 AD and 1936 ± 8 AD. These ages correspond to large instrumental earthquakes that occurred at a distance less than 50 km from our sampling site : the 2003 Taitung Earthquake (Mw 6.8), the 1951 Chenggong Earthquake (Mw 7.1) and the 1935 Lutao Earthquake (Mw 7.0). Such a good correlation between turbidites and (Mw>6) historical instrumental seismic events suggests that the record of mass transport deposits can be used as a paleoseismic indicator in this region.

### 1.7.15 (p) Le Centre d'alerte aux tsunamis pour la Méditerranée Occidentale et l'Océan Atlantique Nord-Est : CENALT

Pascal Roudil<sup>1</sup>, François Schindel<sup>1</sup>, Baptiste Duperray<sup>1</sup>, Audrey Gailler<sup>1</sup>, Hélène Hébert<sup>1</sup>, Anne Loevenbruck<sup>1</sup>, Anne Monnier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>DASE/LDG, CEA, Bruyère le Châtel

Le CENALT (CENTre d'ALerte aux Tsunamis) est responsable de la gestion du centre national d'alerte aux tsunamis français. Depuis sa mise en service opérationnel en juillet 2012, son objectif est de diffuser un message d'alerte en moins de 15 minutes pour tout séisme qui pourrait générer un tsunami en Méditerranée Occidentale et en Océan Atlantique Nord-Est. Les données utilisées, issues de stations françaises et internationales, sont traitées pour permettre une localisation rapide des événements sismiques et pour mesurer le niveau de la mer sur les côtes. L'opérateur CENALT de permanence surveille interactivement toutes les informations produites et utilise les bases de données de références historiques et calculées des séismes et tsunamis pour pouvoir

diffuser le message d'alerte le plus précis possible. Pour certifier le système d'alerte, des tests et exercices sont effectués régulièrement. Ils permettent de valider les modes de communication ainsi que les délais de transmission des différentes liaisons utilisées. En fin d'année 2014, le CENALT participera à l'exercice international aux tsunamis, NEAMWave14, organisé par la Commission Océanographique Intergouvernementale (UNESCO/COI). Le scénario du CENALT consistera en un séisme simulé de magnitude 6.5 en mer Ligure. Des messages d'alerte seront diffusés aux différents points focaux des Etats Membres du système d'alerte aux tsunamis de la zone concernée.

### 1.7.16 (p) Le séisme de Barcelonnette du 7 avril 2014 (ML 5.3) : analyse de la source et des données de mouvement sismique

Olivier Sèbe<sup>1</sup>, Marilyn Denieul<sup>2</sup>, Laurent Bollinger<sup>1</sup>, Yoann Cano<sup>1</sup>,  
 Sylvie Marin<sup>1</sup>, Eric Thauvin<sup>1</sup>, Aurore Laurendeau<sup>1</sup>, Adrien Deschamps<sup>1</sup>, Bruno Hernandez<sup>1</sup>, Hélène Hébert<sup>1</sup>

<sup>1</sup>DASE/LDG, CEA, Bruyère le Châtel

<sup>2</sup>EOST, Strasbourg

Un séisme de magnitude ML = 5.3 a été localisé le 07 Avril 2014 à 19 h 27 TU à l'ouest de Saint-Paul d'Ubaye (Alpes de haute Provence). Il s'est produit dans le massif de l'Embrunnais-Ubaye, régulièrement affecté par une sismicité modérée (dont les séismes du 05/04/1959, d'intensité épicentrale VII-VIII, de magnitude M=5.3, ou le séisme du 26/02/2012, ML = 4.8, Mw = 4.1).

La profondeur de 8 km est contrainte par des phases sismiques de profondeur (pP et sP) à distance télé-sismique. L'inversion des formes d'ondes régionales et l'analyse des polarités des premières arrivées donnent un mécanisme en faille normale, avec une faible composante décrochante dextre. La magnitude MW déterminée par la méthode de coda est de 4.78, en très bon accord avec les inversions sismologiques. Le mécanisme s'accorde avec un glissement sur une faille normale d'orientation NO-SE (pendage 65° vers l'ouest) de petite composante décrochante dextre, ou sa faille conjuguée d'orientation NE-SO, de plus faible pendage est, ces deux directions de faille étant présentes dans l'Ubaye.

Le séisme a été enregistré sur de nombreuses stations françaises, du réseau vélocimétrique du Laboratoire de Détection et de Géophysique (LDG) du CEA, et du Réseau Accélérométrique Permanent (RAP). Les données vélocimétriques courte période du LDG ont été converties en valeurs accélérométriques par correction de la réponse instrumentale. Les accélérations obtenues, au rocher, sont comparées, pour différentes fréquences, aux données du RAP enregistrées dans différentes conditions de sol. Cette analyse donne l'occasion de confronter les données françaises aux modèles de prédiction du mouvement sismique, généralement issus de contextes plus sismiques. Et la mission post-sismique du Groupe Intervention Macrosismique qui a eu lieu quelques jours après le séisme, a permis de recueillir des données macrosismiques, qui peuvent être comparées aux données instrumentales et aux relations d'atténuation du mouvement sismique.

### 1.7.17 (p) Towards a database of potentially active faults for southeast France (Provence) : synthesis and update of available seismotectonic data

Xavier Sengelen<sup>1</sup>, Olivier Bellier<sup>1,2</sup>, Laurent Bollinger<sup>3</sup>, Kévin Manchuel<sup>4</sup>, Jules Fleury<sup>1</sup>, Philippe Dussouillez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>ECCOREV et Labex OT-Med A\*Midex, Aix-Marseille Université,  
 Aix-en-Provence - France

<sup>3</sup>DASE/LDG, CEA, Bruyère le Châtel

<sup>4</sup>Département TEGG, EDF CEIDRE, Aix-en-Provence

The SIGMA (Seismic Ground Motion Assessment) international research and development program in which this study takes place deals with the characterisation and assessment of seismic ground motion in France and Italy, by improving data, methodologies and tools used in seismic hazard estimates. One of its objectives is to bring new insights on the tectonic structures and their seismogenic potential in SE France, a region chosen as the French target area of the project. Indeed, these parameters are critical inputs to a reliable seismic hazard analysis, both when using deterministic or probabilistic methods. We therefore undertake a compilation of published data related to potentially active faults and geological indices of past earthquakes in SE France with a particular interest in documenting the uncertainties on the seismotectonic parameters. Then, we elaborate a GIS platform and its related seismotectonic database in order to be able to confront all information available that describe seismotectonic behaviour of potential active faults. We develop the database structure after analysing the active fault and seismic sources databases already available elsewhere (DISS [INGV - Italy], QAFI [IGME - Spain], Qfaults [USGS - United States], AFDJ [AIST - Japan], NZAFD [GNS - New-Zealand]), as well as two active fault databases covering respectively the PACA region (BRGM, France) and metropolitan France (IRSN, France). This comprehensive database of active fault sources, in which we integrate and update previous seismotectonic synthesis of individual faults in Provence, documents among others the surface and in-depth geometry, kinematics and the seismogenic potential, with their respective uncertainties. This database is planned to be available on a fully integrated GIS platform, and linked with other existing database such as neotectonic and paleoseismological indices as well as instrumental and historical seismological catalogues.

### 1.7.18 (p) Fluids hydrochemical signature of a slow-moving giant landslide rupture unstable slope of Séchillienne, France

Cécile Baudement<sup>1</sup>, Yves Guglielmi<sup>1</sup>, Catherine Bertrand<sup>2</sup>, Sophie Viseur<sup>1</sup>, Aurélien Vallet<sup>2</sup>, Frédéric Cappa<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>Laboratoire Chrono-environnement, Besançon

<sup>3</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

It is well known that pore water pressure is one of the main trigger of rockslides. In giant landslides like in many complex deep-seated systems, one key question is to localize where the active hydromechanical coupling takes place. Here we couple a rockslide spring water chemistry survey to a geomechanical analysis of the slope three dimensional structures to understand the fluids influence on the slope destabilization processes. A 3D geological model of fault network was designed with Gocad software by integrating geological and hydrogeological data (lithology, fractured area, springs chemistry, gallery water inflow...). Fault surfaces complexity was interpolated to depth from surface and gallery geological data. The relationship between effective stress variations, water infiltration, and the geometric complexity of faults have been investigated using the GoCad-3DStress simulator. Significantly different behavior were highlighted, depending on the applied stress tensor and depth. The different models highlight a preferential activation zone in slip and dilation on the N120 faults surfaces at 150m depth. Simulations show that variations of effective stress in this deep area affect the shallow slope surface destabilization explaining the monitored active displacement. The activation of the deep area is coupled with variations of the groundwater chemistry which are discussed as potential proxies to slope catastrophic rupture.

### 1.7.19 (p) Stabilité géo-mécanique des terrils : quels impacts liés aux aménagements et à la surfréquentation des sites ?

Arnaud Gauthier<sup>1</sup>, Frédéric Kowalski<sup>2</sup>, Michel Dubois<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LGCGE, Vileneuve d'Ascq

<sup>2</sup>CPIE Chaîne des Terril, Loos-en-Gohelle

Depuis plus de deux siècles, l'exploitation du charbon dans le Nord-Pas-de-Calais a profondément marqué ce territoire. Un des témoins de cette activité industrielle consiste en l'établissement de Terrils, dont plus de 300 jalonnent le bassin minier. Ainsi, ils revêtent une très grande importance, aussi bien dans l'aménagement paysager du territoire que du point de vue humain. Au delà de leur caractère industriel, ils constituent pour les habitants des lieux de détente et pour la faune et la flore locales des lieux de vie d'une extrême richesse. De même, un regain d'intérêt de la part du public a été constaté au travers d'aménagement paysager. Cependant, le recul sur ces sites n'est que de quelques décennies et de nombreuses questions se posent encore quant à leur évolution à long terme. En effet, loin d'être des sites inertes, ces édifices sont en constante mutation, du fait de l'altération des matériaux, de leur colonisation et de l'incorporation des éléments organiques qui en découle. En outre l'évolution et la structuration des matériaux, lors de la pédogénèse par exemple, peuvent également contribuer à la stabilité géo-mécanique des Terrils. Une partie de cette étude a ainsi porté sur la compréhension des mécanismes intervenant dans cette stabilité, notamment par rapport à un piétinement éventuel de la surface, mais également aux futurs aménagements (escaliers, terrasse panoramique). L'effet de la charge mécanique engendrée par la masse des Terrils a également été prise en compte, et notamment les effets liés au poinçonnement du sol. Notre approche a porté sur différents modes de gestion des terrils existant dans la région : i) terrils non remaniés, non réhabilités ; ii) terrils réhabilités avec apport d'une couche de terre en surface et plantation d'arbres et iii) terrils réhabilités avec plantation d'arbres mais sans apport de terre sur toute la surface.

### 1.7.20 (p) Surveillance de l'aléa « mouvement de terrain » au droit d'un aquifère minier testé par pompage

Philippe Gombert<sup>1</sup>, Ahmed Arbia<sup>1</sup>, Xavier Daupley<sup>1</sup>, Christian Bouffier<sup>1</sup>, Régis Pacot<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INERIS, Verneuil-en-Halatte

Une mine de calcaires asphaltiques du Sud de la France a été exploitée jusqu'en 2002 par galeries souterraines (méthode par chambres et piliers) entre 50 m et 200 m de profondeur. La mine était alors dénoyée par pompage. Des campagnes de nivellement ont montré que ce mode d'exploitation a généré des affaissements d'ordre décimétrique à métrique sur environ 40 ha en surface, au droit des panneaux exploités. A partir de 2008, la mine s'est ennoyée sur 180 m de hauteur, ce qui a créé un aquifère minier d'environ 1,5 Mm<sup>3</sup> et induit un soulèvement des terrains d'amplitude centimétrique. Le soulèvement maximum a été observé au droit des zones les plus profondément exploitées, principalement là où l'épaisseur des formations de recouvrement est la plus forte. Confrontés à un manque d'eau, des exploitants agricoles souhaitent utiliser cet aquifère minier pour l'irrigation. Le débit de pompage prévisionnel (300 m<sup>3</sup>/h) pourrait générer un rabattement de plusieurs dizaines de mètres d'amplitude, susceptible de réactiver certains affaissements. En outre, le programme prévisionnel de pompage prévoit des cycles saisonniers d'exploitation avec un maximum en période estivale et un minimum en période hivernale.

Préalablement à cela, il a été décidé de réaliser un pompage d'essai d'un mois avec suivi des mouvements de terrain en surface au moyen de campagnes hebdomadaires de nivellements et d'un suivi en continu par balises GPS. Ce suivi permettra - si l'exploitation de cet aquifère minier est validée - de définir un programme de pompage (débit, rabattement maximal, périodicité). On présente ici le dispositif mis en place pour surveiller ce pompage et les résultats obtenus à court terme, sachant que le suivi devra se prolonger dans le temps pour évaluer les effets à long terme d'un pompage dans ce type de milieu.

### 1.7.21 (p) Apport de l'imagerie électrique pour l'étude des instabilités du sol liées aux cavités souterraines dans la périphérie d'Oran Algérie

Abderrahmane Bouguern<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, Algérie

Un effondrement s'est produit, dans la périphérie d'Oran. Pour déterminer son origine, on a fait appel à la géophysique. Compte tenu du contraste assez marqué en résistivité électrique entre un vide karstique et les terrains encaissants, le choix de la méthode à appliquer s'est porté sur l'imagerie électrique. Un dispositif de type dipôle-dipôle avec un écartement inter-électrode de 4 mètres est appliqué. Le développement des appareils d'acquisition et des logiciels d'inversion ont permis d'augmenter le rendement et l'efficacité de la méthode. Le long de 12 profils parallèles de 24 électrodes chacun, une acquisition en 2D est réalisée, ensuite les profils sont combinés pour obtenir une image tridimensionnelle réelle. Les pseudo-sections montrent des variations reflétant la complexité et l'hétérogénéité de la géologie locale. La plus petite valeur mesurée est de 42 ohm.m tandis que la plus forte est d'ordre 2000 ohm.m. Le profil 12 inversé, met en évidence une anomalie de 10.000 ohm.m. Le premier forage (SC1) est réalisé pour vérifier la nature de cette anomalie. Cette couche, parfaitement cartographiée présente une épaisseur de 8 mètres et s'étend jusqu'à l'abscisse 42 m. Au-delà de 12-13 m de profondeur, on distingue la présence d'un substratum de basse résistivité sa valeur est inférieure quelque fois de 100 ohm.m. En tenant compte de la nature géologique de chaque niveau traversé par les sondages carottés, on pourrait lier les basses résistivités électriques à un terrain calcaire fracturé et tendre. L'autre élément, issu de l'interprétation des profils 5 et 6 est la mise en évidence d'une anomalie conductrice qui se dessine parfaitement formant une sorte de cuvette relativement profonde (doline) centrée à l'abscisse 32 m. La signature de cette anomalie est typique de celle d'une zone d'effondrement. Les résultats obtenus de la géophysique sont en accord avec ceux révélés par les sondages mécaniques. La forte hétérogénéité du sous-sol de ce site recommande de ne pas faire de corrélations systématiques entre les sondages carottés à cause de leur manque de représentativité spatiale. Les sondages carottés fournissent une information, précise, mais ponctuelle sur la géologie locale, tandis que la tomographie fournit une pseudo-image 2D continue. Les deux types d'informations doivent donc être conjointement analysés pour permettre une meilleure compréhension de la géologie du site.

### 1.7.22 (p) Chronology of volcanic rootless cones and maar in the Plain of La Liste, Auvergne, France

Hervé Leyrit<sup>1</sup>, Pierre Lavina<sup>2</sup>, Pascale Lutz<sup>1</sup>, William Zylberman<sup>1</sup>,  
 Alexis Jaillard<sup>1</sup>, Nolwenn Jallais<sup>1</sup>, Alexandra Batailler<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais

<sup>2</sup>Terre et Volcans, Saint-Dier d'Auvergne

The plain of La Liste, located 2 km south of the crater-lake Pavin in Auvergne (France), is known for hosting several troughs of enigmatic origin. 8 electric resistivity tomography and 6 ground penetrated radar profiles were performed in the Pavin area. The geophysical signature of these structures is clearly distinct from the surrounding peat bogs. Two main types of small-size volcanic structures related to explosive interactions between lava and water-bearing substrates have been identified. First, volcanic rootless cones are clearly related to the Montchal volcano basaltic lava flow that erupted on a marshland around 7000 years ago and are covered by 6700 years-old Pavin pyroclastic deposits. Second, a small maar is characterized by circular crater (40-50 m diameter) with typical tephra ring deposits cross-cutting the 6700 years-old Pavin phreatomagmatic deposits. So, this small maar is the late metropolitan volcanic eruption. The mapping and understanding of these explosive volcanic structures have implications for volcanic hazards assessment.

### 1.7.23 (p) Les dépôts volcanoclastiques du bassin Nord-Comores : sédimentologie, origine et stratigraphie

Alexandre Jannic<sup>1</sup>, Sébastien Zaragosi<sup>1</sup>, Patrick Bachelery<sup>2</sup>, Luc Beaufort<sup>2</sup>, Lea Fournier<sup>1</sup>, Jean-Luc Schneider<sup>1</sup>, Edouard Palis<sup>4</sup>,  
 Thierry Garlan<sup>5</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Talence

<sup>2</sup>LMV, Clermont-Ferrand

<sup>3</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>4</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>5</sup>SHOM, Brest

L'Archipel des Comores, situé dans la partie ouest de l'Océan Indien, regroupe quatre îles volcaniques orientées NW-SE : la Grande Comore, Mohéli, Anjouan et Mayotte. Il s'est formé suite à la dérive de la plaque somalienne au-dessus d'un point chaud. L'archipel des Comores présente la géomorphologie des chaînes d'îles océaniques. La Grande Comore est le siège d'un volcanisme encore actif, Mohéli et Anjouan présentent des volcans dont l'activité est moins récente. Mayotte, l'île la plus vieille de l'archipel, subit une érosion importante. Ces îles volcaniques ont alimenté les fonds marins du bassin sédimentaire au nord, en dépôts volcanoclastiques. Deux carottages effectués lors de la campagne MOZAPHARE nous ont permis d'étudier pour la première fois ces dépôts. La carotte MD96-2067 (11°21'254 S, 44°20'418 E) a été prélevée à 3383 mètres de profondeur, et est située à une centaine de kilomètres au nord de l'archipel, et la carotte MD96-2066 (8°44'762 S, 41°13'707 E) prélevée à une profondeur de 3986 mètres est localisée à 300 km au nord. Le bassin enregistre une activité gravitaire intense. Ces carottes sont principalement composées de séquences volcanoclastiques riches en verres, fragments rocheux et minéraux, intercalés avec des sédiments hémipélagiques riches en foraminifères. Des alternances de matériel grossier, de lamines de forte et basse énergie montrent le caractère turbiditique de ces dépôts. Des analyses d'anisotropie de susceptibilité magnétique viennent confirmer l'hypothèse d'une coulée turbide plutôt qu'un dépôt par décantation. L'analyse des verres confirme l'origine comorienne de ces fragments volcaniques. Deux compositions géochimiques distinctes sont retrouvées : l'une téphritique, fortement alcaline (La Grille Type), l'autre basaltique, moyennement alcaline (Karthala Type). Enfin, la stratigraphie des carottes nous a permis d'obtenir un calendrier de l'activité volcanique couvrant les 2 derniers Ma.

### 1.7.24 (p) Crater-lake Pavin, France : ERT - GPR coupled investigations and new magma volume assessment using modeling software computation

William Zylberman<sup>1</sup>, Hervé Leyrit<sup>1</sup>, Pascale Lutz<sup>1</sup>, Alexis Jaillard<sup>1</sup>,  
 Pierre Lavina<sup>2</sup>, Nolwenn Jallais<sup>1</sup>, Alexandra Batailler<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais

<sup>2</sup>Terre et Volcans, Saint-Dier-d'Auvergne

The crater-lake Pavin, located in Auvergne and dated 6700 years BP, is the youngest volcano and one of the two acidic maar in metropolitan France. In 1980, Bourdier estimated the total volume of its erupted products to approximately  $7.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ . Using a coupled approach ERT-GPR, we investigate the geophysical characteristics of the Pavin volcanic deposit in order to better understand its geometry, sedimentary features and to make a new isopach model and volume computation. 9 GPR and 15 ERT profiles were realized and correlated to geological data. We show that sedimentary structures such as dunes, impact sags of blocks and unconformities are detectable within the deposit. Moreover, the thickness of the deposit can be estimated at proximal locations where the base of the deposit cannot be reached with most of usual geological methods. Once the model digitalized, a Surfer 8 ©Golden software computation gave an estimated total volume of  $5.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ , which is  $2.3 \times 10^7 \text{ m}^3$  less than previously estimated. The complementary Pyle method, usually used to determine magma volumes from tephra fall deposits, is applied to the model and gave a total volume of  $5.6 \times 10^7 \text{ m}^3$ , corresponding to a 7% difference between the two estimations. This novel result shows that in some cases tephra fall decay models can be applied to volcanic deposits resulting from mixed eruptive dynamics.

### 1.7.25 (p) Projet LiDiCam : approche pluridisciplinaire pour caractériser le risque de rupture de digues en basse vallée du Rhône face aux aléas des crues et des séismes

Claudio Carvajal<sup>1</sup>, Paul Allard<sup>2</sup>, Olivier Bellier<sup>3</sup>, Olivier Chanel<sup>4</sup>,  
 Nadia Benahmed<sup>1</sup>, Guillaume Veylon<sup>1</sup>, Kien Nguyen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IRSTEA, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>ESPACE

<sup>3</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>4</sup>Aix-Marseille School of Economics, Marseille

La basse vallée du Rhône est une zone du bassin méditerranéen où les aléas naturels d'inondations et sismiques sont particulièrement significatifs. Elle comporte également un parc important d'ouvrages hydrauliques en remblai (environ 300 km de digues dans le Grand Delta du Rhône) soumis à ces aléas, dont la rupture aurait des conséquences humaines et socioéconomiques catastrophiques.

Dans ce contexte, le projet de recherche LiDiCam, soutenu par le Labex OT-Med (A\*Midex, AMU), vise à mettre en œuvre une approche pluridisciplinaire pour caractériser le risque de rupture de digues en basse vallée du Rhône face aux aléas des crues et des séismes. La démarche pluridisciplinaire envisagée comporte une approche historique, tectonique, géotechnique et économique. L'approche historique se focalisera sur l'aléa de crues en étudiant les brèches et les causes de rupture des digues lors des grandes crues du XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècle en basse vallée du Rhône. En parallèle, la caractérisation de l'aléa sismique sera abordée, en tenant compte de plusieurs échelles temporelles et spatiales, par la construction d'un modèle sismotectonique pour la zone d'étude. Une approche géotechnique sera ensuite déployée pour caractériser le

comportement et le potentiel de liquéfaction des digues analysées vis-à-vis des aléas de crues et des sollicitations sismiques à partir d'une étude expérimentale et de modélisation numérique. À l'issue de ces analyses, une évaluation des impacts potentiels en cas de rupture de digue sera menée par une approche économique selon plusieurs scénarios. L'objectif de notre présentation sera d'illustrer la complémentarité des approches et des partenaires et d'aborder les attendus ainsi que l'état d'avancement du projet LiDiCam.

### 1.7.26 (p) Analyse de la vulnérabilité aux aléas naturels côtiers des agglomérations du Havre et de Dunkerque : deux zones basses et urbanisées en domaine macrotidal

Sylvain Elineau<sup>1,2</sup>, Aurélie Maspataud<sup>3</sup>, Anne Duperret<sup>1,2</sup>,  
 Marie-Hélène Ruz<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LOMC, Le Havre

<sup>2</sup>GMGL Vannes

<sup>3</sup>LOG, Wimereux

Les agglomérations du Havre et de Dunkerque, respectivement localisées à l'embouchure de la Seine et dans la plaine maritime flamande, sont deux territoires bas, urbanisés et vulnérables aux conditions météorologiques extrêmes qui sont à même d'induire différents aléas tels que des submersions marines sur le front de mer, des inondations urbaines ainsi qu'un recul du trait de côte.

Ces deux territoires présentent de nombreux aménagements anthropiques (digues, épis, perrés) et localement de cordons dunaires protégeant des inondations marines dans le Nord, et font l'objet d'une gestion hydraulique particulière. Au Nord, la majorité de la plaine maritime flamande est constituée de polders dotés d'un réseau de canaux (les wateringues) chargé de drainer vers la mer ses eaux excédentaires, ce qui peut être rendu impossible dans certaines conditions météorologiques non nécessairement extrêmes (surcote, grande marée), et induire des inondations urbaines. En Manche Orientale, la ville du Havre, développée autour de bassins portuaires, a été historiquement touchée par plusieurs submersions marines induisant des débordements, une saturation du réseau d'évacuation souterrain puis l'apparition de résurgences hydrauliques en zones basses urbaines. Ici comme dans le Nord, certains événements météo-marins récents, auraient pu avoir des conséquences beaucoup plus graves, surtout s'ils avaient eu lieu lors d'une grande marée d'équinoxe. Malgré des aménagements pour réduire le risque d'inondation, l'aléa est toujours présent dans le cas d'occurrence de niveaux d'eau extrêmes par combinaison défavorable (marégraphiques, anémométriques, hydrodynamiques...).

Les travaux récents menés en collaboration avec des institutions locales reposent sur deux approches comparables ciblées sur la compréhension du risque de submersion marine : une analyse multi-critères des aléas côtiers, croisant des données de topographie fine (LiDAR et DGPS) avec de hauts niveaux d'eau, ainsi qu'avec des événements extrêmes historiques et récents. Dans le contexte actuel de changement global et de l'élévation prévue du niveau de la mer, il est nécessaire pour les autorités locales de prendre en compte les impacts potentiels et les périodes de retour de tels événements, afin de mettre en œuvre des mesures de prévention des risques, des politiques de gestion côtière, et d'augmenter l'efficacité des systèmes hydrauliques.

### 1.7.27 (p) Étude de l'évolution urbaine de la ville de Nouakchott (Mauritanie) et son trait de côte entre 2004 et 2010

Kamel Hachemi<sup>1,2,3</sup>, Yves-François Thomas<sup>3</sup>, Ould El-Moustapha Senhoury<sup>4</sup>, Maria Achek-Youcef<sup>5</sup>, André Ozer<sup>6</sup>, Hacem-Anis Nouacer<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Université Panthéon-Sorbonne, Paris

<sup>2</sup>Université Paris 12, Créteil

<sup>3</sup>LGP, Meudon

<sup>4</sup>Faculté des Sciences et Techniques, Université de Nouakchott Mauritanie

<sup>5</sup>Laboratoire Architecture Ville Urbanisme Environnement, Paris

<sup>6</sup>Géomorphologie et Télédétection, Département de Géographie, Université de Liège, Belgique

<sup>7</sup>Faculté d'Electronique et d'Informatique, Département d'Informatique, Université des Sciences et de la Technologie, Alger, Algérie

La ville de Nouakchott connaît actuellement une urbanisation informelle galopante, 2000 habitants en 1955 sur plus d'un million en 2012. Géographiquement, elle est située entre l'océan Atlantique à l'ouest et le désert à l'est. Elle s'est construite sur un site quasiment plan, partiellement situé en dessous du niveau de la mer. A l'ouest, elle est protégée par un cordon dunaire littoral relativement étroit, large en moyenne de 150 m, d'altitude inférieure à 6 m et faiblement végétalisé. Situation qui favorise des intrusions marines causées par des surcotes de tempêtes. La croissance rapide de la densité du bâti et du tissu urbain, l'érosion du cordon dunaire le long de la côte, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des fortes pluies, l'élévation du niveau de la mer, la hausse de la nappe phréatique, la densification des infrastructures routières, industrielles, rendent cette ville de plus d'un million d'habitants de plus en plus vulnérable. Notre travail a consisté à suivre l'extension urbaine de cette ville, à quantifier l'évolution du trait de côte par une étude diachronique d'images radar SAR du satellite ENVISAT. Pour cela, nous avons produit 9 images d'amplitude à différentes dates (2004-2010) calibrées et géoréférencées à 20 mètres de résolution (WGS 84, UTM). Nous avons par suite cartographié la ville et le trait de côte à ces dates. Nous avons observé et mesuré une accumulation moyenne d'environ 100 m au nord du port (~14 m/an) et une érosion moyenne d'environ 140 m au sud (~20 m/an) pour une période de presque de 7 ans (janvier 2004/octobre 2010). Ces résultats ont été comparés à ceux plus anciens (1980 à 1998). Nous avons constaté que la vitesse d'avancée sableuse du trait de la côte au nord a diminué par un facteur 3 entre 2004 et 2010. Par contre, la vitesse de recul de la côte au sud semble rester constante. Nous avons mis en évidence cette extension désorganisée et incessante. Nous avons pu estimer sa vitesse moyenne d'accroissement sous l'effet de la croissance de la population qui est de l'ordre de 5,7 km<sup>2</sup>/an, soit un taux d'accroissement annuel de l'ordre de 6,1 %. Grâce à l'analyse de changements, nous avons constaté que la ville de Nouakchott est contrainte à une extension urbaine en deux directions : (i) une vers le littoral (zone Ouest inondable) où elle doit faire face aux inondations ; (ii) l'autre vers l'Est, le désert (zone dunaires) où elle est confrontée aux problèmes d'ensablement.

### 1.7.28 (p) The CO<sub>2</sub>-Vadose Project : Numerical modelling to perform a geochemical monitoring methodology in the carbonate vadose zone

Philippe Delaplace<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison

The monitoring of CO<sub>2</sub> storage sites is a paramount aspect for sites security and for the industrial deployment of CCS technologies. At the soil level, the monitoring of potential CO<sub>2</sub> leakage will be requested, at least for high hazard areas (wells, faults). In this study, we compared the performance of a soil gas baseline survey with the disturbance in the gas composition and flux expected for a low amplitude diffuse leakage of CO<sub>2</sub>.

A numerical study of a CO<sub>2</sub> leakage was performed at the vadose scale by creating an underground CO<sub>2</sub> source and observing its migration toward the atmosphere across a natural limestone formation. Only CO<sub>2</sub> molecular diffusion in the gas phase and CO<sub>2</sub> dissolution in the irreducible water were taken into account in this numerical model, following the description of a natural site on which field work was performed. A gas geochemistry baseline was performed in key locations and determined from the numerical predictions of the CO<sub>2</sub> plume extension. In the light of the numerical experiment, we show how the different soil gas parameters measured are potentially useful for the detection of diffuse CO<sub>2</sub> leaks at the soil level and we present performances of different analyses and their respective addition to such studies.

### 1.7.29 (p) Utilisation de la sensibilité thermomécanique pour le suivi de compartiments rocheux instables

Pierre Bottelin<sup>1,2</sup>, Denis Jongmans<sup>1</sup>, Laurent Baillet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>GET, Toulouse

D'un autre côté, il a été montré que f1 est sensible aux fluctuations de température ambiante. Cette sensibilité dépend de la structure du site et de la période d'étude considérée. Ces variations réversibles de f1 peuvent néanmoins masquer de petits changements de structure causés par de l'endommagement, faisant de f1 un paramètre délicat à utiliser pour la surveillance d'aléas.

Sur une colonne rocheuse spécifique, une analyse détaillée à l'échelle journalière a montré que la température et f1 sont pratiquement en phase, avec un délai de quelques heures. L'interprétation Plusieurs études récentes ont montré que le bruit de fond enregistré sur des compartiments rocheux instables permet d'en isoler les fréquences de résonance. Dans le cas d'une colonne calcaire, une chute de la plus basse fréquence de résonance (f1) a été observée peu avant son éboulement, traduisant le découplage de la masse instable par rapport au massif rocheux. Ces résultats suggèrent que le suivi de f1 pourrait être utilisé comme paramètre précurseur à la rupture.

est qu'une augmentation de f1 résulte du renforcement du contact au niveau de l'interface entre la colonne instable et le massif rocheux lié à de l'expansion thermique, et inversement. Cette sensibilité thermique de f1 face à une variation de température (notée SfT) apporte donc une information sur l'état de la surface de rupture et on propose de l'utiliser comme nouveau précurseur pour détecter de l'endommagement.

Les tests conduits sur plusieurs compartiments instables montrent que SfT dépend du site d'études, les plus grandes valeurs de SfT étant observées sur le site montrant une fracture largement ouverte. En effet, les simulations numériques aux éléments finis confirment que SfT augmente avec l'endommagement.

Contrairement à f1, le paramètre SfT ne montre pas de variation significative avec la température, ce qui facilite le suivi de l'état mécanique de compartiments rocheux instables.

## 1.8 Observation de la Terre, télédétection

### Responsables :

- Jean-Michel Martinez (GET, Toulouse)  
jean-michel.martinez@get.obs-mip.fr
- Philippe Paillou (Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux)  
philippe.paillou@obs.u-bordeaux1.fr
- Nesrine Chehata (ENSEGID, Bordeaux)  
Nesrine.Chehata@ensegid.fr

### Résumé :

La télédétection spatiale est devenue un outil indispensable pour les géosciences, en permettant notamment de densifier et spatialiser des observations menées sur le terrain et qui sont souvent limitées par leur représentativité spatiale ou temporelle. Au fil des années, de nombreuses techniques ont permis d'ouvrir de nouveaux champs d'application, en particulier pour l'étude des surfaces continentales. Les applications cartographiques ont bénéficié de la très haute résolution spatiale, des données radar (SAR, interférométrie, altimétrie) et de l'accès à des séries temporelles qui dépassent désormais plusieurs décennies. De nouvelles techniques comme l'imagerie hyperspectrale, le LIDAR ou la gravimétrie donnent accès au suivi et à la détection de propriétés de surface extrêmement difficile à caractériser sur le terrain (topographie, cycle de l'eau, pédologie etc.). Enfin, les plateformes d'acquisition se multiplient et une large gamme de capteurs satellite, aéroportés et de drones permettent d'appréhender une large gamme d'échelles spatiales. Cette session sera l'opportunité de présenter des résultats récents concernant les développements et les applications de la télédétection pour l'étude des processus de surface en géosciences.

### 1.8.1 (o) Télédétection par analyse de retours d'onde LIDAR et spectrométrie à hautes résolutions des espaces sensibles en environnement côtier et urbain

Antoine Ba<sup>1</sup>, Patrick Launeau<sup>1</sup>, Marc Robin<sup>2</sup>, Saïd Moussaoui<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LPG, Nantes

<sup>2</sup>LETG, Nantes

<sup>3</sup>École Centrale de Nantes

L'objectif de ce travail est, à partir de données d'un LiDAR (Light Detection and Ranging) topographique et/ou bathymétrique aéroporté, d'accéder à des informations très fines sur la morphologie de diverses surfaces, dont la composition sera donnée par l'analyse à hautes résolutions spectrales et spatiales de la réflexion solaire grâce à l'acquisition conjointe ou décalée d'images aériennes hyperspectrales dans le VNIR et le SWIR (de 160 à 280 canaux). L'information morphologique sera complétée par une information hyperspectrale permettant d'accéder à des absorptions chimiques des matériaux observés. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire d'obtenir des jeux de données LiDAR et hyperspectrales rigoureusement calés dans l'espace. L'intégration d'un modèle d'élévation issu du LiDAR dans la procédure de géoréférencement des images hyperspectrales permet de restituer très précisément un ensemble de données 4D (latitude, longitude, hauteur, signature spectrale) avec une résolution horizontale de 1.8 m. Cette étape de géoréférencement marque l'initialisation d'une chaîne de traitement de données hyperspectrales sur une gamme de longueur d'ondes de 400 à 2500 nm. Ce traitement permet d'obtenir des images en réflectance grâce à des corrections atmosphériques et calibration terrain. Les données traitées ont été acquises en environnement côtier, notamment au niveau des dunes l'île de Noirmoutier (Vendée, France), où il est d'intérêt de suivre la répartition et l'évolution de la végétation ou encore la dynamique morphologique de la plage et de la dune. En termes de suivi de végétation, il sera possible de cartographier la répartition des principales espèces présentes en réalisant une classification par l'outil Spectral Angle Mapper qui permet de reconnaître les similitudes angulaires entre les spectres issus des images hyperspectrales et ceux d'une bibliothèque spectrale acquise sur le terrain. Cette classification sera affinée par une étude morphologique de la végétation réalisée à partir des données LiDAR. En matière de dynamique sédimentaire côtière, il sera possible d'extraire des données 4D un modèle de surface, qui permettra d'étudier la morphologie littorale. La résolution du jeu de données ouvre vers la question de démixage dans les pixels, afin d'extraire au sein de ces pixels l'information utile en fonction du thème abordé.

### 1.8.2 (o) Low altitude aerial photogrammetry : an effective tool for very high-resolution topographic surveys. Applications in geomorphology on braided river channels and sandy beaches

Jules Fleury<sup>1</sup>, Guillaume Brunier<sup>1</sup>, Edward Anthony<sup>1,2</sup>, Claude Vella<sup>1</sup>, Virginie Pothin<sup>1</sup>, Philippe Dussouillez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>Institut Universitaire de France, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Low-altitude aerial photogrammetry offers new perspectives for geomorphology and other fields requiring high-resolution topographic data. It combines the advantages of the reproducibility of GPS topographic surveys and the high accuracy of LIDAR, but at relatively low-cost compared to the latter method and with the synaptic advantage of remote

sensing compared to the first one.

In order to evaluate this technique, we conducted several photogrammetric surveys : first on the embayed sandy beaches of Cayenne, French Guyana, to quantify subtle on-going morphological changes ; second on the braided river system of the Buech in the Alps, to measure riverbed changes and erosion-accretion processes. The field protocol included, first, subvertical aerial photographs taken by a microlight aircraft, equipped with a full-frame DSLM and wide angle lense, flying at an altitude of 150 m along several parallel axes. Meanwhile on the ground, we spread several 40x40cm targets georeferenced by RTK DGPS. Lastly, we measured numerous ground control points in order to assess accuracy. We operated the production of the 3D model and its derived products with user-friendly Agisoft (c) Photoscan Professional software. In both the beach and river field sites, from several hundreds of pictures with centimetre pixel resolution, we obtained a DEM resolution of 10 cm and a vertical accuracy of less than 5 cm. As expected, accuracy values are best on dry grounds and decrease towards water saturated and vegetalized grounds. Many features that were not visible from classical techniques could be measured. Very subtle beach morphological features in the upper surf zone such as rip channels, and subaerial features such as erosion scarps and aeolian forms, clearly appear. On the braided river bed, pebble bar features and river banks scarps are clearly visible. This technique will certainly constitute an essential complement and provide new insight into fluvial and coastal geomorphic studies.

### 1.8.3 (o) Mapping potential shallow water in the Gobi Desert using remote sensing : Lake Ulaan Nuur

Philippe Paillou<sup>1</sup>, Troy Sternberg<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LAB, Bordeaux

<sup>2</sup>University of Oxford, School of Geography and the Environment

Access to water resources in desert environments is an endemic challenge in developing countries. Shallow water is an essential resource for rural communities and has become significant source for urban centres, agriculture and mining. In the past conventional methodologies were used in the search for water ; today advanced remote sensing from space offer new techniques to identify and define potential untapped groundwater in drylands. This research investigates a potential major water resource in the Gobi Desert, Mongolia. Using remote sensing from space we integrated topography, radar images and optical images into GIS tools to investigate and identify potential shallow water correlated to large palaeolakes. This work integrates the palaeoclimatic history of southern Mongolia with present water circumstances in the region. Findings indicated Lake Ulaan Nuur as a promising site for hydro-geological testing and water resource prospecting as measurement suggests a past lake area of >19,000 km<sup>2</sup> in the Mongolian Gobi.

### 1.8.4 (o) Expert-driven semi automated procedure by GIS for geomorphological mapping : application to a mountainous area

Yannick Thiery<sup>1,2</sup>, Mathieu Fressard<sup>1</sup>, Olivier Maquaire<sup>1</sup>, Christophe Deborde<sup>2</sup>, Erik Genot<sup>2</sup>, Marie Laugie<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LETG, Caen

<sup>2</sup>Euro engineering, Hélioparc Pau

Knowledge of landforms is one of the key to understand the landscape and to prepare natural hazard assessment. This type of information is generally compiled in a geomorphological map at various scales. The advantages of this type document are (i) to show in a synthetic view

the landforms, the material, the processes and (ii) to understand quickly their genesis. Generally these maps are created after a carefully field expertise and are reported manually on a topographic map. The process is time consuming and very subjective.

Since few years automated or semi-automated geomorphological mapping techniques by GIS replaced classical techniques. The best results are often obtained with very accurate data (high spatial precision); but the cost is still relatively high (such data derived from LIDAR acquisition). Thus, in most cases, the tests remain localized on small surfaces with few transpositions on another survey area.

One of the challenges that may be discussed is to get an accurate geomorphological map at mesoscale (from 1/50 000 to 1/10 000 scale) which could be used for natural hazards assessment by a semi-automatic procedure and low cost.

To achieve this challenge we propose an expert-driven semi-automated procedure by GIS with various sets of data with different quality. The procedure is based on AHP (analytic hierarchy process) approach used to analyzing complex decisions and is adapted for our problematic. The variations in the quality of the data sets refer to the resolution and accuracy of the data, but also to the cost (both economical and time spent on the database construction).

The method was applied to a mountainous area where an expert geomorphological map is available and is used to compare the results and to validate the approach.

### 1.8.5 (o) Suivi des processus de transport sédimentaires au sein des rivières et lacs par télédétections hyperspectrale et spatiale

Jean-Michel Martinez<sup>1</sup>, Raul Espinoza Villar<sup>2</sup>, Rita Piscocoya<sup>3</sup>, Sylvain Pinet<sup>1</sup>, Gérard Cochonneau<sup>3</sup>, Naziano Filizola<sup>4</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Université de Brasilia, Brésil

<sup>3</sup>Agence de l'Eau du Brésil, Brasilia, Brésil

<sup>4</sup>Université Fédérale de l'Etat d'Amazonas, Manaus, Brésil

L'étude des flux sédimentaires dans les cours d'eaux permet de quantifier les processus d'érosion et de comprendre les transferts de matières au sein d'un bassin hydrographique depuis les zones de production (reliefs) jusqu'aux zones de déposition (estuaire, zones d'inondation). La mesure de ces flux reste dépendante d'échantillonnages terrain coûteux et différentes alternatives sont actuellement proposées pour améliorer la caractérisation des processus hydrosédimentaires avec des techniques de télédétection optique ou acoustique. Concernant la télédétection optique, l'étude de la « couleur des eaux », c'est-à-dire la variation spectrale des propriétés optiques des eaux présente l'avantage de détecter et de quantifier la présence de manière minérale mais aussi, en théorie, de discriminer le type de matériel particulaire ainsi que la présence de matière organique au sein des eaux naturelles.

Nos travaux, ces dernières années, ont démontré que l'on peut utiliser efficacement les données satellitaires à large champ (capteurs MODIS) pour quantifier les flux sédimentaires de surface dans les fleuves de grands systèmes hydrographiques comme le fleuve Amazone mais aussi au sein de lacs de barrages soumis à des processus d'ensablement progressif. En apportant une information spatialisée et à haute résolution temporelle sur des processus hydro-sédimentaires difficiles à échantillonner sur le terrain, les outils que nous développons sont directement valorisables pour l'étude de l'évolution des surfaces continentales.

Dans notre présentation, nous analyserons la variabilité des propriétés optiques des eaux mesurées lors de plusieurs dizaines de campagnes de mesures qui sont ensuite utilisées pour calibrer les données de réflectance produites par les satellites. Des exemples d'application seront présentés permettant d'aborder la question de la précision de ces tech-

niques puis l'étude des processus de sédimentation ou de remobilisation au sein des cours d'eau.

### 1.8.6 (o) L'apport du « big data » et des données satellitaires d'observation de la Terre facilement accessibles au service de la Géologie et de l'Environnement

Serge Riazanoff<sup>1</sup>, Benoît Deffontaines<sup>1</sup>, Jean-Paul Xavier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>VisioTerra, Champs-sur-Marne

<sup>2</sup>Université Paris-Est Marne-la-Vallée, Champs-sur-Marne

Depuis la réception des premières images d'observation de la Terre en 1972, l'utilisation de la télédétection pour l'analyse géologique et environnementale présente un intérêt croissant. La nature des sols caractérisée en imagerie optique a pu être couplée avec la détection d'éléments structuraux à partir d'images radar. Plus récemment, les techniques d'interférométrie (DinSAR, PSI, Small Baseline...) ont permis de mesurer précisément des mouvements millimétriques de la surface topographique. Le grand nombre de systèmes radar et l'accessibilité aux données et à leur programmation ont permis de développer de nouveaux projets tels que le suivi des pollutions, l'évolution des côtes ou la cartographie des zones humides.

Après l'avènement de Google Earth, un nombre croissant de données géolocalisées facilement accessibles sont disponibles sur le Web. Les agences spatiales et de nombreux organismes de recherche fournissent désormais des quantités gigantesques de données satellitaires dans ce qu'on appelle désormais le « big data ». Les nouveaux programmes d'observation de la Terre lancés récemment ou en cours vont constituer une source considérable d'information et de nouvelles applications sous réserve de profondes modifications dans les méthodes d'utilisation. Il est donc question ici d'exposer quelques aspects liés à des utilisations très innovantes de ces données tant sur le plan de la création de bases de données géoréférencées appliquées aux domaines géologiques et des nombreux problèmes inhérents tant techniques (localisation, disponibilité, chargement et dépôt, utilisation, qualité des BD...) que thématiques (base de données ciblées, sémantique, propriété...).

L'exposé propose un panorama de ces opportunités tant techniques qu'en termes de données, pour illustrer quelques applications géologiques et environnementales détaillées : en géologie structurale, en occupation du sol, en exploration pétrolière (indices naturels d'huiles) ou en surveillance de sites.

### 1.8.7 (p) Étude de l'inondation du Chott el Djérid en 2007 par les données de réflectance MODIS

Khairat Abbas<sup>1</sup>, Jean-Paul Deroin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Reims Champagne-Ardenne, Groupe d'Etude sur les Géomatériaux et Environnements Naturels, Anthropiques et Archéologiques, Reims

La zone des chotts tunisiens couvre 5360 km<sup>2</sup> de la Tunisie présaharienne. Il s'agit d'un vaste ensemble de dépressions salées (Chott el Fedjaj, Chott el Djérid, Chott el Gharsa) qui se prolongent jusqu'en Algérie. Le secteur se caractérise par une moyenne annuelle des précipitations qui ne dépasse pas 110 mm avec un fort déficit hydrique pendant environ six mois. L'évapotranspiration (ET) moyenne annuelle est d'environ 1500 mm avec un maximum de juin à août (température maximum en juillet : 48°C). Les précipitations directes, le ruissellement et la nappes souterraines alimentent le Chott el Djérid qui forme l'exutoire principal de la nappe Complexe Terminale et la nappe aquifère. Le

24 avril 2007, un épisode exceptionnel de précipitations (95-100 mm) a touché l'ensemble du Chott el Djérid et ses environs. Un lac temporaire s'est formé résultant de la combinaison entre les précipitations directes, le ruissellement et l'apport de la nappe souterraine.

Suite à ce phénomène, les phases d'inondation et d'assèchement ont été mises en évidence entre le mois d'avril et d'août 2007 grâce aux données de réflectance de MOD09A1 dans la bande moyen infrarouge (1628-1652 nm) combinées à une série d'images de MODIS ainsi qu'aux données pluviométriques. Les produits de réflectance de surface MOD09A1 procurent une estimation de la réflectance dans les bandes 1-7, à 500m de résolution et sur une base de synthèse sur huit jours.

Quatre stades de l'assèchement du lac temporaire ont été identifiés : le stade d'inondation où les valeurs de réflectance atteignent zéro, puis deux stades intermédiaires où les valeurs de réflectance augmentent progressivement (5-30%) en raison de l'augmentation progressive de la température et de l'ET et, en fin, le stade d'assèchement complet de la surface où les valeurs de réflectance atteignent leur maximum (>30%).

### 1.8.8 (p) Une nouvelle méthode pour déterminer les zones érodées dans les régions arides à l'aide de l'imagerie Landsat et les données lithologiques

Ali Aydda<sup>1</sup>, Ahmed Algouti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Département de Géologie, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech

L'érosion (soit par l'eau ou par le vent) est l'un des problèmes environnementaux pour les agents locaux et les organismes gouvernementaux dans le monde entier. L'identification des zones érodées dans les zones arides et humides peut être très utile pour une meilleure planification environnementale, et peut aider les décideurs de l'environnement de mettre une stratégie de lutte contre l'érosion des sols et des sédiments dans ces régions.

Dans ce présent travail, nous présentons une nouvelle méthode pour déterminer les zones érodées dans les zones arides. Cette méthode est basée sur l'imagerie Landsat et les données lithologiques de la région. Les données lithologiques ont été collectées sur terrain à l'aide des points de contrôle de Global Positioning System (GPS) et les cartes géologiques de terrain. Dans ce contexte, deux cartes lithologiques de la zone d'étude des années tinitial (ti) et tfinal (tf) sont analysés afin de déterminer les changements de données lithologiques. Les deux cartes sont obtenues en appliquant l'algorithme du maximum de vraisemblance sur deux images Landsat (ti et tf). Après la classification et à la validation des images, une technique de détection de changement des données est adopté afin de déterminer les zones érodées. La méthode est appliquée dans la partie nord du Sahara Atlantique afin de confirmer leur efficacité.

### 1.8.9 (p) Évaluation de la vitesse de déplacement des dunes dans le Sahara Atlantique (SW du Maroc) à l'aide de télédétection multi-temporelle et SIG

Ali Aydda<sup>1</sup>, Ahmed Algouti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Département de Géologie, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences, Marrakech

L'ensablement est l'un des problèmes environnementaux les plus graves dans le Sahara Atlantique (SW du Maroc), par lequel tous les domaines, les zones agricoles, la route nationale, et les villes, sont menacés. Dans

cette zone, l'intensive érosion due à l'extrême aridité est le facteur responsable de la dynamique des dunes de sable. Donc, un suivi mensuel/annuel de la dynamique des dunes de sable est nécessaire pour évaluer la vitesse de leurs déplacements.

Dans notre zone d'étude, l'étude sur terrain de la dynamique des dunes était bien réalisée à l'échelle des dunes uniques et était basé sur le couplage de mesures GPS et des photos aériennes. Vraiment l'étude sur terrain est un élément essentiel pour étudier la dynamique des dunes uniques. Néanmoins, le travail sur terrain n'a pas la capacité de découvrir une grande partie des dunes surtout à l'échelle de couloir dunaire. En outre, l'évaluation de taux de déplacement des dunes de sable par traçage manuel sur les photos aériennes numériques est un travail intensif. Biblio-graphiquement, des nouvelles études montrées que la meilleure façon de résoudre ce problème est d'utiliser les données de télédétection.

Dans ce travail, nous présentons une technique basée sur l'analyse des images satellites Landsat multi-temporelles pour évaluer le taux de déplacement des dunes. La méthodologie adoptée principalement basée sur l'extraction automatique de la forme des dunes à partir d'images satellites. Après l'extraction, la vectorisation de données est nécessaire pour l'exportées dans la plate-forme SIG afin d'évaluer le taux de mouvement des dunes.

### 1.8.10 (p) Utilisation de la thermographie infrarouge pour la recherche d'anciens puits miniers remblayés

Candice Lagny<sup>1</sup>, Philippe Gombert<sup>1</sup>, Stéphane Lafortune<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INERIS, Verneuil-en-Halatte

Suite à la fermeture des mines, la localisation de nombreux puits d'accès a été perdue et leur repérage reste difficile. On teste ici une méthode par thermographie infrarouge basée sur la détection d'une anomalie thermique liée à une émission gazeuse en provenance d'un ancien puits.

Les puits recherchés étant remblayés, le moteur principal d'écoulement du gaz depuis les vieux travaux miniers vers la surface devrait être la chute de pression barométrique. Ainsi, une fenêtre météorologique favorable a été visée : période de dépression d'une part et intervention en fin de journée (pas de rayonnement solaire) d'autre part.

Une méthode originale a été retenue, celle du ballon captif. Elle réside dans l'utilisation d'un ballon de 4 m<sup>3</sup> gonflé à l'hélium raccordé à un chariot au sol. Celui-ci est doté d'un treuil qui permet de gérer l'altitude du ballon. Un routeur, une antenne Wifi et une télécommande permettent à un autre opérateur de piloter la caméra thermique depuis le sol.

Des puits témoins (dont la position est connue sur le terrain) ont été utilisés pour tester la méthode. La campagne a été réalisée en hiver, pour que le couvert végétal soit très mince, condition nécessaire à toute détection. La température était basse mais positive, l'absence de pluie avant la campagne et de vent pendant celle-ci ainsi que la prévision à la chute de la pression barométrique devaient permettre de réunir les conditions les plus favorables. Les puits dont la position était connue sur le terrain sont apparus sur les thermogrammes en anomalie positive à tout comme d'autres anomalies.

L'utilisation de drones pourrait aussi être envisagée, cette technique s'étant beaucoup développée. Cependant, par rapport à d'autres moyens aéroportés (drones, ULM), le ballon captif présente plusieurs avantages : il ne nécessite pas d'autorisation de vol préalable ce qui permet de mieux choisir la fenêtre météorologique, il permet d'intervenir de nuit et facilite une liaison directe avec des opérateurs faisant simultanément de la reconnaissance au sol.

## 1.9 Processus d'évolution des surfaces planétaires

### Responsables :

- Olivier Bourgeois (LPG, Nantes)  
olivier.bourgeois@univ-nantes.fr
- David Baratoux (IRAP, Toulouse)  
david.baratoux@irap.omp.eu

### Résumé :

Au cours de la dernière décennie, plusieurs missions spatiales ont exploré la partie interne comme la partie externe du Système Solaire. Les nombreuses données acquises grâce à ces missions spatiales et aux observations depuis la Terre montrent que les surfaces des différents corps solides du Système Solaire (planètes, satellites, astéroïdes, comètes,...) sont soumises à des processus d'évolution extrêmement variés. Ces processus superficiels comprennent aussi bien des changements morphologiques (déformations tectoniques, volcanisme, impacts, érosion, transport, sédimentation,...) que des changements de composition (chimie, minéralogie, pétrologie), qui impliquent des transferts, dans des conditions de pression et de température très variables et souvent très différentes de celles qui règnent sur Terre, entre différents types de matériaux solides, liquides et gazeux plus ou moins exotiques : silicates, carbonates, oxydes, argiles, sels, glaces, eau, CO<sub>2</sub>, hydrocarbures, clathrates, tholins,...

Certains de ces processus d'évolution superficiels sont comparables à ceux qui ont déjà été largement décrits, quantifiés et modélisés sur la Terre ; l'évolution des surfaces planétaires en réponse à ces processus peut donc être utilement contrainte grâce à l'analyse de l'évolution géologique de la surface terrestre. En revanche, d'autres processus d'évolution des surfaces planétaires sont inexistantes, peu représentés ou encore largement méconnus sur Terre ; la reconnaissance de l'importance dans le Système Solaire, de ces processus exotiques, peut donc fournir une opportunité de reconsidérer leur rôle dans l'évolution de la surface terrestre.

Le but de cette session est donc de favoriser les échanges et les rapprochements entre les différentes communautés impliquées dans la compréhension des processus actifs à la surface des planètes : géologues, géomorphologues, hydrologues, glaciologues, climatologues, astronomes, physiciens, chimistes,... Elle accueillera des présentations portant sur tous les aspects de l'évolution des surfaces planétaires, quels que soient les outils utilisés (observation, modélisation, expérimentation) et quels que soient les corps solides étudiés (Terre, autres planètes telluriques, satellites des planètes géantes, astéroïdes, comètes,...).

### 1.9.1 (o) Possible small-sized sorted polygons in and around the Argyre impact-basin : new evidence of regional-scale freeze-thaw cycling in the southern hemisphere of Mars

Richard Soare<sup>1</sup>, Susan Conway<sup>2</sup>, Matt Balme<sup>2</sup>, James Dohm<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Geography, Dawson College, Montreal, Canada

<sup>2</sup>Department of Physical Sciences, Open University Milton Keynes, Royaume-Uni

<sup>3</sup>The University Museum, The University of Tokyo, Japon

The Argyre basin (~ 1500km in diameter) in the southern hemisphere of Mars is ancient, having been formed by the impact of a large body ~ 4 Gya. Despite its age the basin continues to be altered by diverse geological and geomorphological processes. Here, we report multiple sites at which small-sized ( $\leq 20\text{m}$ ) and relatively-youthful sorted patterned-grounds (SPGs) (in the form of polygons) occur in and around Charitum Montes; the latter is a large rim-structure on the southern margin of the Argyre-basin. The sorting process, most commonly, refers to the self-organization of clasts and regolith in response to the freeze-thaw cycling of water and its cryoturbation in « ice-rich » ground. Often, the SPGs occur in periglacial environments where « the volume of ice in the ground exceeds the total pore-volume that the ground would have under natural unfrozen conditions. »

In our study of Argyre-centred HiRISE images (30-600S; 290-3400E) we have found that the SPGs are distributed along a narrow latitudinal-band (~ 550S) and a broad longitudinal-reach (~ 290-3400 E). This distribution blankets geological units of widely disparate ages and indicates that the SPG is relatively young. Moreover, wherever the SPGs are observed, remnants of a light-toned and smooth textured mantling unit also occur. The mantle unit is thought to be latitude-dependent, ice-rich and of late Amazonian Epoch age. In all instances, the mantle-unit either overlies the SPGs or is adjacent to it, albeit at a slightly higher elevation. Hence, we conclude that the formation of the mantle unit postdates that of the SPGs. We also suggest that if the freeze-thaw cycling of water is responsible for the origin of the SPGs, then periglacial modifications of the regional landscape at or around the higher latitudes of the Argyre impact-basin are more widespread than has been thought hitherto.

### 1.9.2 (o) Early hesperian warm-based glaciation in isidis planitia, Mars

Thomas Guidat<sup>1</sup>, Stéphane Pochat<sup>2</sup>, Olivier Bourgeois<sup>2</sup>, Ondrej Soucek<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Trinity College Dublin, Irlande

<sup>2</sup>LPG, Nantes

<sup>3</sup>Charles University in Prague, Mathematical Institute, République tchèque

Isidis Planitia includes many landforms especially the Thumbprint Terrain dating back from the Early Hesperian and whose origin is still under discussion. A new geomorphic mapping initiative studying the basin of Isidis as a whole at high resolution has been completed for the first time. The data elucidates on landforms inter-relationship and spatial organization.

All the landforms described in this study are located on 3 geological units : 1) Thumbprint Terrains located in the center of the basin : HApc, 2) smooth plain surrounding HApc : Hps and 3) terrain of knobby material located discontinuously on Hps : Hmk. Five different landforms have been described : 1) Geological Contact (HApc/Hps); 2) Cones (Aligned Cones, Isolated Cones and Cones in Fields); 3) Arcuate Ridges; 4) Sinuous Ridges; 5) Linear Depressions.

The clearest relationship is between Aligned Cones (AC) and Arcuate

Ridges (AR) : similar morphometry, location and organisation. They form a whorl-shape pattern avoiding the center of Isidis. The central area exhibit only Cone in fields. Simple Ridges are perpendicular to the whorl-shape pattern and in the periphery. Finally, Linear Depressions (LD) are sometimes filled with a SR on HApc. These landforms association are similar to wet-based glaciation environment on Earth. The pattern of periodic alternating arcuate shapes is similar in form and scale to terrestrial ribbed moraines (subglacially formed transverse ridges). SR have characteristics similar to terrestrial eskers (associated to other glacial landforms such as mounds, potential kames, and moraines). Finally, Linear depressions share characteristics with terrestrial Tunnel Valleys. The presence of these landforms assemblages in Isidis Planitia suggests a wet-based glacial origin. However, the interpreted ice sheet has undergone different thermal regime considering the lack of interpreted landforms related to wet-based glaciation in the central area. This suggests the presence of a stagnant part the ice sheet which results from a negative thermal anomaly of the lithosphere located below the centre of Isidis Planitia. This interpretation is consistent with climate models that show snow accumulation for different obliquity of the planet in the NW area of Isidis, precisely where the whorl-shape pattern starts.

### 1.9.3 (o) Global and local characterization of Titan's dune fields

Amandine Garcia<sup>1</sup>, Sylvain Courrech Du Pont<sup>2</sup>, Sébastien Rodriguez<sup>1</sup>, Clément Narteau<sup>3</sup>, Antoine Lucas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Astrophysique Interactions Multi-échelles, Université Paris VII, CEA/Saclay

<sup>2</sup>Laboratoire Matière et Systèmes Complexes, Paris

<sup>3</sup>IPG Paris

Cassini/RADAR high-resolution images of Titan's surface revealed linear features, geomorphologically similar to longitudinal dunes. Those dunes cover a large portion, 7.8%, of the whole surface of Titan, and 13.4% are present on the 58.4% of the surface imaged by the RADAR/SAR from July 2004 to July 2013. The type and shapes of dunes depend on the wind orientation but also on the sediment availability. Those features represent clues for the understanding of the climatic history on the satellite. By using the joint analysis between RADAR/SAR observations and the infrared VIMS mosaic corrected for atmospheric contributions acquired through July 2013 and June 2010 respectively, we found a very high degree of correlation at global scale (more than 70%) between the RADAR dunes and a specific infrared VIMS spectral unit, the « dark brown unit ». These results allow us to better constrain the composition and the total surface area of the dunes material. In parallel, we use a laboratory experiments able to reproduce millimeter to centimeter subaqueous dunes by controlling environmental parameters (type of wind, amount of sediment) in order to characterize more precisely the different modes of dune formation and evolution, and constrain the physics behind the morphogenesis and dynamics of Titan's dunes. The interdisciplinary connection between observations at a global scale and the local study with laboratory experiment will allow us to figure out the mystery of the processes that are implied on Titan and provide answers about its complex climatology.

### 1.9.4 (o) Modeling the radar response of Linear Dunes and Mega-Yardangs on Titan : Geological implications

Benoit Seignovert<sup>1</sup>, Philippe Paillou<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LGLTPE, Lyon

<sup>2</sup>LAB, Bordeaux

Linear geomorphology features on Earth are well-studied using geological field observations and remote sensing (optical, radar). These structures can be divided into two groups : the wind-deposit and accumulation areas known as linear sand dunes ; and the wind-abraded ridges on eroded cohesive rocks known as mega-yardangs.

In this study, we performed a comparative planetology approach to discriminate between these two features on Saturn's moon Titan, by comparing the radar signature of their terrestrial analogues. The Ku-band (13.8 GHz) Synthetic Aperture Radar (SAR) onboard the Cassini spacecraft is able to sense through the optically-opaque atmosphere of Titan, but the resolution of this instrument (200 m) is not sufficient to clearly observe the morphology of linear structures. We then considered orbital radar images of terrestrial structures, provided by the high resolution (18 m) X-band radar (9.6 GHz) of the TerraSAR-X mission. We acquired images of the Great Sand Sea (Egypt) and the Namib Desert (Namibia) for the linear dunes ; and of the Lut Desert (Iran) and the Djourab Desert (Chad) for the mega-yardangs. We modeled the geometrical effect of the topography using DEM models provided by SRTM and GDEM, and the surface roughness effect was estimated using single scattering models such as Integral Equation model and Geometrical Optics model. We were able to reproduce in a quite faithful way the backscattered radar signal by terrestrial dunes and mega-yardangs.

These results were applied on Titan to the analysis of T8 and T49 flybys over the Bellet equatorial region, which contains linear dune fields, and to the analysis of T64 and T83 flybys, which show potential mega-yardang structures. Based on our quantitative radar modeling results, we can confirm that linear structures in T64 and T83 are actually mega-yardangs. As on Earth mega-yardang are usually formed over former lakes depressions on homogeneous rocks with a strong and stable unidirectional wind erosion over million years. Their existence on Titan could indicate that lakes were existing in lower latitude regions in the past, providing a new constrain for past climatic models of Titan.

### 1.9.5 (o) Dissolution as a geomorphological process on Titan : a landscape evolution model

Cyril Fleurant<sup>1</sup>, Olivier Bourgeois<sup>2</sup>, Thomas Cornet<sup>3</sup>, Stéphane Le Mouélic<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LETG, Angers

<sup>2</sup>LPG, Nantes

<sup>3</sup>European Space Agency, European Space Astronomy Centre, Madrid, Espagne

The main objective of the study is to understand the processes of genesis and the evolution of dissolution landforms recently discovered on Titan (Saturn's largest moon) by comparison with a terrestrial analogue (Cockpit karst terrain, Barbecue Bottom, Jamaica). Our work includes morphological mapping on Titan and on the Earth, use of remotely sensed images and topographic data (SRTM DEM, ASTER, RADAR SAR images acquired by the Cassini orbiter), morphometric analyses and the implementation of a Landscape Evolution Model. The strengths and originalities of this study include both the comparative morphometric analysis 2D/3D of landscapes on Titan and the Earth, the use of a Landscape Evolution Model and provides an opportunity to indirectly access to Titan's surface chemical and physical properties - which are currently hardly reachable through direct measurements - by comparing landscape geometries on Titan and on the Earth.

### 1.9.6 (o) Traçage en milieu terrestre de nanocomposites carbonés synthétisés par aéroplasma

Marie-Agnès Courty<sup>1</sup>, Jean-Michel Martinez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PROMES, Perpignan

Les procédés de type dusty-plasma jouent un rôle majeur dans l'évolution du milieu interstellaire. Pour la Terre, la formation d'un dusty-plasma est supposée se produire dans la couche météorique (meteoric smoke layer) par production de nanoparticules ionisées à partir des produits d'ablation de la traînée météoritique. Cette présentation vise à démontrer que les ondes de choc produites par les rentrées atmosphériques à hypervélocité génèrent en fait un « aéroplasma » ionisant. Les données expérimentales et les modèles théoriques attestent que les précurseurs gazeux terrestres chargés en aérosols solides, et dopés en nanoparticules de métal, subissent, en quelques ms, une pyrolyse due à l'onde de choc, suivie de la synthèse instantanée d'hydrocarbures et de particules carbonées pures. L'état initial atmosphérique (nature et abondance des aérosols), les paramètres de l'onde de choc (vitesse, section efficace) et la quantité de catalyseurs métalliques conditionnent la production de nanocomposites carbonés synthétisés à partir des hydrocarbures issus de l'onde de choc. Les caractères des matériaux produits seront illustrés par des études de débris suite à des rentrées atmosphériques récentes (météore du 2 août 2011, météorite de Chelyabinsk du 15 février 2013), et de retombées historiques (Tunguska 30 juin 1908, Orgueil 15 mai 1864). La comparaison avec des situations géologiques reconnues en tant qu'impact ou discutables montrera que les propriétés uniques des nanocomposites carbonés synthétisés par « aéroplasma » permettent de reconnaître les signatures de rentrées atmosphériques à hypervélocité. L'identification de nanocomposites carbonés produits par onde de choc à partir de précurseurs terrestres confirme que la catégorisation des retombées de particules stratosphériques en produits météoritiques est erronée et a été surestimée. Cette étude souligne le rôle des nanocomposites carbonés comme stock durable de carbone solide formé instantanément par voie plasma naturel.

### 1.9.7 (p) Modélisation de la coda sismique lunaire

Kevin Gillet<sup>1</sup>, Ludovic Margerin<sup>1</sup>, Marie Calvet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IRAP, Toulouse

Les signaux sismiques lunaires présentent une différence majeure par rapport aux signaux terrestres : une coda de plusieurs dizaines de minutes. Cette caractéristique indique une faible absorption ainsi qu'une forte concentration d'hétérogénéités dans la Lune entraînant une diffusion très importante des ondes sismiques. L'analyse des signaux associés à différents types d'événements enregistrés sur la Lune (impacts, séismes intermédiaires et séismes profonds) devrait permettre d'affiner cette interprétation. En effet, les signaux d'impacts témoignent d'un scattering plus marqué que les signaux de séismes intermédiaires et profonds : on ne distingue pas sur les enregistrements l'arrivée des ondes balistiques P et S. Cela suggère que les hétérogénéités sont concentrées dans une couche superficielle correspondant à un milieu très fracturé : le méga-réolite lunaire. Compte tenu de la faible absorption, les temps de propagation des ondes diffusées deviennent non négligeables devant celui des ondes balistiques traversant le volume de la Lune. La modélisation de la diffusion des ondes sismiques dans la sphère est donc nécessaire et devrait permettre de mieux caractériser le méga-réolite lunaire, notamment en précisant son épaisseur et les caractéristiques de son hétérogénéité. A l'occasion de ce RST, nous espérons présenter les premières modélisations de diffusion multiple en géométrie sphérique.

### 1.9.8 (p) Analyse des vallées Martiennes des basses et moyennes latitudes : quelles implications en termes de paléoenvironnements ?

Marine Gourronc<sup>1</sup>, Olivier Bourgeois<sup>1</sup>, Stéphane Pochat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LPG, Nantes

La diversité des paysages martiens témoigne de l'influence des processus d'érosion et de dépôt sur l'évolution en milieu éolien, fluvial, glaciaire et périglaciaire de la surface majoritairement basaltique de cette planète. Si les contraintes sur le climat actuel de Mars sont assez bien connues pour la période géologique la plus récente de son histoire (Amazonien, correspondant aux 3 derniers milliards d'années), le climat qui régnait auparavant reste en revanche discuté. Les traces morphologiques d'écoulements liquides et les minéraux d'altération hydratés (argiles, sulfates, chlorures) présents sur les terrains les plus anciens de Mars sont classiquement interprétés comme des marqueurs d'un climat plus chaud et plus humide dans le passé.

Nous avons observé, dans les terrains les plus anciens de Mars et localisés dans les basses latitudes, des systèmes de vallées dont la morphologie et l'organisation spatiale ne correspondent que rarement à celles de réseaux de vallées fluviales alimentées par des précipitations. En revanche, la forme en carte et en coupe de ces réseaux de vallées rappelle fortement celle des réseaux de « tunnel valleys » terrestres, des vallées creusées par les eaux de fonte sous-glaciaires et pro-glaciaires. Or, dans plusieurs régions de la Terre, ces réseaux de « tunnel valleys » sont les seuls témoins actuellement préservés de l'existence de vastes calottes glaciaires dans le passé. Afin de tester l'hypothèse que certaines vallées martiennes sont des « tunnel valleys » sous- ou pro-glaciaires pouvant témoigner de l'étendue passée de glaciations anciennes, nous faisons une analyse comparative, avec leurs analogues terrestres, de leur morphologie et de leur organisation spatiale. Le nombre croissant d'indices morphologiques et minéralogiques suggérant l'englacement de vastes régions de Mars avant l'Amazonien viendraient corroborer cette hypothèse.

### 1.9.9 (p) Dunes de glace sur la calotte Nord de Mars : analogie avec les mégadunes en Antarctique

Clémence Herny<sup>1</sup>, Marion Massé<sup>2</sup>, Olivier Bourgeois<sup>1</sup>, Sabrina Carpy<sup>1</sup>, Stéphane Le Mouélic<sup>1</sup>, Thomas Appéré<sup>3,4</sup>, Isaac Smith<sup>5</sup>, Aymeric Spiga<sup>5</sup>, Sébastien Rodriguez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LPG, Nantes

<sup>2</sup>IAS, Orsay

<sup>3</sup>AIM, Saclay

<sup>4</sup>IPAG, Grenoble

<sup>5</sup>LMD, Paris

Le bilan de masse des calottes est guidé par des interactions complexes entre l'atmosphère et la cryosphère. La rétroaction entre les vents catabatiques et la surface de glace conduit à la formation de dunes de glace qui migrent à contre-sens du vent. Nous utilisons des données altimétriques, spectroscopiques et d'imagerie acquises par les orbiteurs martiens pour mettre en évidence la présence de deux longueurs d'ondes superposées de dunes de glace à la surface de la calotte polaire Nord de Mars. Les pentes face au vent, les crêtes et les inter-dunes sont couvertes par de la glace récente et parfois par des sastrugi indiquant une accumulation préférentielle. Les pentes sous le vent se caractérisent par une surface lisse constituée de gros grains de glace ou par l'exhumation de couches de poussière et de glace ancienne attestant d'une accumulation réduite ou d'une ablation nette de la glace. Ces dunes présentent des similitudes avec les mégadunes de neige en Antarctique en termes

de morphologie, de texture de surface, de taille de grain et de stratigraphie. La découverte de ces dunes de glace fournit une base pour le développement d'un modèle commun d'interaction entre le vent et la glace à la surface des calottes de Mars et de la Terre.

## 1.10 Géomagnétisme et archéologie : re-tracer la variation séculaire du champ géomagnétique et applications en datation (CNFGG)

### Responsables :

- Gwenael Hervé (Ludwig-Maximilians Universität, Munich, Allemagne) [gwenaelhervel@gmail.com](mailto:gwenaelhervel@gmail.com)
- Erwan Thébault (IPG Paris) [ethebault@ipgp.fr](mailto:ethebault@ipgp.fr)

### Résumé :

Au cours des dix dernières années, l'acquisition de nombreuses données archéologiques et volcaniques de référence a permis de considérablement étendre nos connaissances sur la variation séculaire du champ géomagnétique durant les huit derniers millénaires. De nouvelles courbes locales de variation séculaire (master curves) et des modèles géomagnétiques globaux et régionaux ont été proposés. Les recherches sur cette thématique ont été particulièrement dynamiques en Europe occidentale et cette session sera l'occasion de réunir l'ensemble de cette communauté pour discuter de ces récents développements méthodologiques. Nous souhaitons notamment des contributions sur de nouvelles données de référence en direction et en intensité et sur de nouvelles approches de modélisation. Ces présentations permettront notamment de confronter la précision et la résolution des différents référentiels développés par différentes approches statistiques. La discussion portera aussi sur la pertinence d'une sélection des données de référence en particulier des données sédimentaires (carottes lacustres et marine). La session abordera enfin les applications des courbes de variation séculaire et des modèles géomagnétiques en sciences de la Terre et en archéologie : reconstructions de la position et du moment du dipôle, études des jerks et spikes archéomagnétiques, datations archéomagnétiques et contributions à la chronologie des sites archéologiques ...

### 1.10.1 *Keynote communication* : Geomagnetic intensity variations in Western Europe for the past 1500 years : looking for rapid fluctuations

Agnès Genevey<sup>1</sup>, Yves Gallet<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LAMS, Paris

<sup>2</sup>IPG Paris

We present a synthesis of archeointensity results, which we obtained in France and more generally in Western Europe for the period covering the past 1500 years. These data were derived from a large collection of fragments of pottery and bricks and, for very few of them, of still in situ structures. These archaeological artifacts, precisely dated by archaeological and historical constraints, were mostly analyzed on the Triaxe magnetometer using a tailored experimental protocol. Altogether our data describe coherent intensity variations characterized by high values during the Early Middle Age followed by decreasing intensities, though interrupted by three intensity maxima. The comparison of our results with the other data available in Western Europe will allow us to discuss the issues related to the reliability and accuracy of the archeointensity data and will question our ability to retrieve rapid intensity variations, as seen in our dataset and which were notably proposed to track archeomagnetic jerks in the history of the geomagnetic field.

### 1.10.2 *Keynote communication* : Modélisation stochastique de séries temporelles archéomagnétiques

Gabrielle Hellio<sup>1</sup>, Nicolas Gillet<sup>1</sup>, Claire Bouligand<sup>1</sup>, Dominique Jault<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

La reconstruction du champ archéomagnétique repose sur l'estimation du champ magnétique ancien enregistré dans les vestiges archéologiques. Les modèles actuels, pour pallier la mauvaise répartition spatiale et temporelle des données, s'appuient sur des hypothèses fortes quant à la forme du champ magnétique et sur une régularisation arbitraire de la complexité spatiale et des dérivées temporelles des coefficients de Gauss évitant ainsi le problème de non-unicité des solutions. La dynamique du noyau ne justifie pas l'a priori implicite introduit par ces hypothèses et requiert, pour son étude, des statistiques a posteriori réalistes qui ne seront pas fournies par des modèles s'appuyant sur de telles régularisations.

Afin de s'affranchir des régularisations classiques nous faisons le choix d'un a priori stochastique utilisé dans le cadre des processus gaussiens et justifié par la forme du spectre géomagnétique. Ces processus permettent non seulement de nous affranchir de l'utilisation des splines, mais aussi, associés à l'utilisation de chaînes de Markov, de prendre en compte les erreurs de datation des données. Nous obtenons des densités de probabilité pour l'évolution temporelle de la déclinaison, l'inclinaison et l'intensité du champ magnétique. Ces dernières nous fournissent non seulement une information sur les processus qui se déroulent dans le noyau, mais sont aussi très utiles dans la cadre de la datation archéomagnétique.

### 1.10.3 (o) La modélisation du champ archéomagnétique aux échelles locales et globales

Erwan Thebault<sup>1</sup>, Yves Gallet<sup>1</sup>, Agnès Genevey<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>LAMS, Paris

Des efforts importants sont déployés pour modéliser les données archéomagnétiques à différentes échelles spatiales dans le but de dévoiler la nature des processus dynamo qui opèrent dans le noyau terrestre sur des échelles de temps centenaires et millénaires. Le choix de la méthode de modélisation entraîne implicitement des compromis qui ont des effets importants sur les interprétations. Les modèles mathématiques globaux apportent des contraintes observationnelles qui permettent de caractériser certaines propriétés du champ magnétique à grande échelle. Cependant, ils sont trop lisses et manquent de résolution spatiale de sorte que des écarts importants sont observés avec des ensembles régionaux de données magnétiques. Ces écarts sont souvent mal compris et peuvent être attribués aux erreurs sur les données ou sur les modèles. Au contraire, les modèles régionaux peuvent mettre en évidence de petites variations spatiales dans les régions à forte densité de données. Leur inconvénient est qu'il est difficile de certifier que les structures qu'ils semblent montrer sont globales. Une dernière solution consiste à représenter les données en un seul endroit afin d'identifier les variations temporelles rapides. Cette approche sacrifie l'information sur les variations spatiales du champ de sorte que toute variation spatiale mal corrigée devient interprétable en termes de variation temporelle. Nous proposons de discuter des avantages et des inconvénients de ces trois approches et de déterminer si elles peuvent être réconciliées. Pour cela, nous allons surtout mettre l'accent sur les difficultés techniques propres à chacune des techniques communément employées pour la représentation des données et discuterons des hypothèses implicites qui sont faites lors de leur emploi.

### 1.10.4 (o) Archeomagnetic spikes : geophysical likelihood and possible impact on the radio-carbon production curve

Alexandre Fournier<sup>1</sup>, Yves Gallet<sup>1</sup>, Philip Livermore<sup>2</sup>, Ilya Usoskin<sup>3</sup>, Gena Kovaltsov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>University of Leeds, School of Earth and Environment, Royaume-Uni

<sup>3</sup>Sodankylä Geophysical Observatory, University of Oulu Physics Dept., Finlande

<sup>4</sup>Ioffe Physical-Technical Institute, St-Petersburg, Russie

Recent studies (Ben Yosef et al., EPSL, 2009 ; Shaar et al., EPSL, 2011) propose extreme archeomagnetic intensity changes (termed spikes) in the range  $\sim 4\text{-}5 \mu\text{T/year}$  c.a. 1000 BC in the Near East, around 40 to 50 times larger than values typical of the present-day. In order to investigate whether such extreme changes are consistent with a model of the source region of the magnetic field, namely the fluid flow at the surface of Earth's core, we construct upper bounds for instantaneous magnetic intensity change at an arbitrary site on the Earth's surface. These bounds are constrained by the amount of kinetic energy available to sustain the change. Further, we focus attention on two end-members of optimized core surface flow structure : unrestricted and purely-toroidal. As the derivation of the bounds demands complete knowledge of the geomagnetic field at the core surface, we model the unknown field by means of a Monte Carlo approach - consult Livermore et al. (EPSL, 2014) for more details.

We find that optimized core flows are always large-scale and that they tend to generate a non-dipole, quadrupole-dominated secular variation at the Earth's surface. The dependence of the upper bounds as a function of site location reflects the large-scale structure of the intensity itself : stronger field permits more rapid change. For the site in the Near East, purely-toroidal flows have upper bounds of approximately  $0.6 \mu\text{T/year}$ , whereas unrestricted flows increase this bound to  $1.20 \mu\text{T/year}$ . We favour the former as more geophysically sound, on the account of a large body of previous results from core surface flow inversions and consistency with the existence of a thermally stratified layer at the top of the

core.

We conclude that the reported occurrences of extreme intensity changes as suggested in the Near East are not compatible with the structure of core-flow as inferred from our current understanding of observational and theoretical considerations. However, since future advances in core dynamics may plausibly offer an explanation, other corroborative examples of spikes may be sought on elsewhere on the Earth's surface, or in different records. Indeed, we discuss how such extreme events may impact the production of radiocarbon and whether the evidence for these should be directly sought in the radiocarbon production curve.

### 1.10.5 (p) Potentiel de l'archéointensité en datation archéomagnétique au haut Moyen-Âge et au premier millénaire av. J.-C. : illustration avec cinq fours de Cumae, Megara Hyblaea et Incoronata (Italie)

Gwenaël Hervé<sup>1</sup>, Philippe Lanos<sup>2</sup>, Annick Chauvin<sup>3</sup>, Mathilde Villette<sup>4</sup>, Mario Denti<sup>4</sup>, Priscilla Munzi<sup>5</sup>, Jean-Pierre Brun<sup>6</sup>, Henri Tréziny<sup>7</sup>, Francesco Javier Pavon-Carrasco<sup>8</sup>

<sup>1</sup>*Geo- und Umweltwissenschaften, Ludwig-Maximilians Universität, Munich, Allemagne*

<sup>2</sup>*IRAMAT-CRPA, Pessac*

<sup>3</sup>*Géosciences Rennes*

<sup>4</sup>*UMR6566 CREAAH, Rennes*

<sup>5</sup>*Centre Jean Bérard Naples, Italie*

<sup>6</sup>*Collège de France, Paris*

<sup>7</sup>*Centre Camille Jullian, CNRS : UMR7299 Aix-en-Provence*

<sup>8</sup>*Instituto Nazionale de Geofisica e Vulcanologia, Rome - Italie*

Cette communication présente les datations archéomagnétiques de cinq fours mis au jour sur les sites de Megara Hyblaea (Sicile), d'Incoronata (Basilicate) et de Cumae (Campanie). Le contexte archéologique place le fonctionnement de ces fours à l'époque grecque (premier millénaire av. J.-C.) à Megara Hyblaea et Incoronata et au haut Moyen-Âge à Cumae. Au moins 15 prélèvements par structure ont été effectués suivant la méthode du chapeau de plâtre ou par carottage des parois. Les archéodirections moyennes ont été déterminées après désaimantation thermique et par champ alternatif et les archéointensités par le protocole de Thellier-Thellier avec corrections d'anisotropie et de vitesse de

refroidissement. La datation archéomagnétique de ces structures illustre la difficulté du choix du référentiel en Italie méridionale. En effet, les courbes de variation séculaire italiennes demeurent trop imprécises ou incomplètes du fait d'un nombre insuffisant de données de référence (Tema et al., 2006 ; 2013). L'utilisation des courbes d'Europe occidentale, construites à partir d'archéointensités de référence de qualité, est discutable en raison de l'éloignement par rapport au point de référence Paris (1300 à 1600 km). Les référentiels d'Europe de l'Est sont plus proches (800 km), mais le faible nombre d'archéointensités de référence de qualité ne permet pas une datation fiable. Aussi, l'alternative la plus fiable aux courbes italiennes s'avère le modèle européen SCH.A.DIF.3k construit après sélection des données d'intensité suivant le protocole de mesure au laboratoire et le nombre d'échantillons (Pavon-Carrasco et al., en révision). Les résultats mettent en évidence le potentiel de datation de l'archéointensité grâce à sa forte variation séculaire au haut Moyen-Âge et au premier millénaire av. J.-C. (Gomez-Paccard et al., 2012 ; Hervé et al., 2013). L'archéointensité affine en effet de 20 à 30% la datation obtenue avec l'archéodirection seule. De nouvelles intensités de référence en Europe permettraient d'optimiser encore ce potentiel.

### 1.10.6 (p) Examples of archeomagnetic chronology at Mari (Tell Hariri/Syria)

Yves Gallet<sup>1</sup>, Agnès Genevey<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*IPG Paris*

<sup>2</sup>*LAMS, Paris*

In the past 15 years, we have been involved in archeomagnetic studies focusing on the investigation of the geomagnetic field intensity variations in Syria over the past seven millennia BC, and more generally in the Middle East. Numerous archeointensity data from different archeological sites were obtained using the experimental protocol developed for the Triaxial magnetometer. In addition to the information that such a large archeointensity data set provides to our understanding of regional millennial-scale field behavior, it can also bring constraints on the relative chronology of baked clay structures discovered in a given archeological site. This presentation will discuss archeological implications of Bronze Age archeointensity data from the Mesopotamian city of Mari in eastern Syria.

## Thème 2

# Bassins, réservoirs et processus sédimentaires - *Basins, reservoirs and sedimentary processes*

Animateurs : Cédric Bonnel (LFC-R, Pau), Thierry Mulder (EPOC, Bordeaux)

### 2.1 Dynamique des bassins sédimentaires, environnements de dépôt et paléogéographies (ASF)

#### Basin dynamics, depositional environments and paleogeography (ASF)

##### Responsables :

- Cécile Robin (Géosciences Rennes)  
cecile.robin@univ-rennes1.fr
- François Guillocheau (Géosciences Rennes)  
francois.guillocheau@univ-rennes1.fr

##### Résumé :

Les bassins sédimentaires sont les enregistreurs de la déformation de la lithosphère et du climat. Ces dernières années ont marqué un regain d'intérêt pour certains bassins : les rifts dont l'essentiel des modèles dataient des années 70s et 80s, les bassins intracratoniques avec la nécessaire connaissance des déformations subtiles à très grande longueur d'onde (x1000 km) d'origine mantellique et avec les plates-formes archéennes et paléoprotérozoïques, mais également les marges obliques et transformantes ou les bassins extensifs fini-orogéniques. L'objectif de ce thème est triple : (1) susciter des **synthèses de bassins** pour comprendre l'évolution de la subsidence long terme des bassins et les perturbations à moyen/court terme (déformations intraplaques par exemple), (2) comprendre à différentes échelles de temps et d'espace les **relations déformation (climat) / érosion-sédimentation**, depuis le chevauchement ou le bloc basculé jusqu'aux panaches mantelliennes et (3) comprendre l'incidence de ces déformations de différentes longueurs d'onde sur les **paysages sédimentaires anciens**, leurs différences par rapport à l'Actuel et les conséquences sur la distribution et la nature des faciès sédimentaires anciens (paléogéographie *s.l.*).

### 2.1.1 (o) Erosion messinienne et sédimentation post-crise en haute-vallée du Rhône

Jean-Pierre Suc<sup>1</sup>, Georges Clauzon<sup>2</sup>, Jean-Loup Rubino<sup>3</sup>,  
 Speranta-Maria Popescu<sup>4</sup>, Estelle Leroux<sup>5</sup>,

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>3</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>4</sup>GeoBioStratData.Consulting (GBSD), Rillieux la Pape

<sup>5</sup>LDO, Plouzané

L'érosion messinienne a été mise en évidence dans le sous-sol lyonnais lors du percement du tunnel du périphérique Nord en 1995, confirmant l'hypothèse d'un important creusement fluvial avancée par Russo (1964). Les sondages dans le remblaiement sédimentaire de cette vallée messinienne ont montré la présence de coquilles d'huîtres, suggérant que la mer zancléenne avait dépassé Lyon.

Nous avons donc repris les investigations dans le cône deltaïque s'étalant au débouché de la vallée morte de la Cluse des Hôpitaux qui se trouve être un bon candidat comme vallée messinienne du Rhône franchissant le domaine jurassien avant son soulèvement. Les assises ligniteuses et sablo-argileuses décrites par Delafond & Depéret (1894) en discordance sur la Molasse tortonienne ont été retrouvées sur les berges de l'Ain. Ces couches s'emboîtent dans les dépôts miocènes et progradent vers le Sud avec un pendage sédimentaire de 10 à 25°. Leur étude palynologique (grains de pollen, kystes de dinoflagellés) montre qu'il s'agit bien de sédiments plus jeunes que la Molasse miocène, qui se sont déposés dans un environnement deltaïque subissant quelques influences marines.

L'érosion fluviale messinienne a donc eu un impact manifeste à plus de 310 km du littoral méditerranéen actuel, distance à laquelle l'invasion marine zancléenne est également manifeste. Ce résultat annihile l'hypothèse des canyons messiniens d'origine sous-marine avancée par Roveri et al. (2014).

Ce travail a été réalisé dans le cadre du Programme « Actions Marges MEDOCC ».

Delafond F., Depéret C., 1894. Les terrains tertiaires de la Bresse et leurs gîtes de lignites et de minerais de fer. Etudes des gîtes minéraux de la France, Paris, 13-302.

Roveri M., Manzi V., Bergamasco A., Falcieri F.M., Gennari R., Lugli S., Schreiber B.C., 2014. Dense shelf water cascading and Messinian canyons : a new scenario for the Mediterranean Salinity Crisis. Amer. J. Sci., 314, 751-784.

Russo P., 1964. Géologie et hydrologie appliqués à l'urbanisme dans les collines lyonnaises. Audin et Cie, Lyon, 205 p.

### 2.1.2 (o) Événements « Lago Mare » en domaine méditerranéen, biostratigraphie et paléoenvironnements

Speranta-Maria Popescu<sup>1</sup>, Mathieu Dalibard<sup>1</sup>, Jean-Pierre Suc<sup>2</sup>, Nadia Barhoun<sup>3</sup>, Mihaela - Carmen Melinte-Dobrinescu<sup>4</sup>, Maria-Angela Bassetti<sup>5</sup>, Simina Deaconu<sup>1</sup>, Damien Do Couto<sup>6</sup>, Jean-Luc Auxière<sup>7</sup>, Christian Gorini<sup>2</sup>, Jonathan Floodpage<sup>7</sup>, Jean-Loup Rubino<sup>8</sup>, Marina Rabineau<sup>9</sup>, Daniel Aslanian<sup>10</sup>

<sup>1</sup>GEOBIOSTRATDATA.CONSULTING, Rillieux la pape

<sup>2</sup>ISTeP, Paris

<sup>3</sup>Université Hassan II-Mohammedia, Faculté des Sciences Ben M'Sik, Casablanca, Maroc

<sup>4</sup>Institute National de Géologie Marine et Géo-écologie (GEOECOMAR), Bucarest, Roumanie

<sup>5</sup>CEFREM, Perpignan

<sup>6</sup>University of Geneva, Section of Earth and Environmental Sciences, Suisse

<sup>7</sup>TOTAL, Paris-La Défense

<sup>8</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>9</sup>IUEM, Plouzané

<sup>10</sup>Laboratoire de Géodynamique et de Géophysique, Plouzané

Des dépôts riches en organismes saumâtres (mollusques, ostracodes) d'origine paratéthysienne sont connus en relation avec la Crise de salinité messinienne dans les bassins périphériques et centraux de Méditerranée. Ces dépôts, attribués au Messinien terminal, étaient considérés appartenir à un seul événement à l'échelle méditerranéenne, connu sous le nom de « Lago Mare » (Orszag-Sperber, 2006). Les travaux dans les bassins périphériques ont révélé deux événements « Lago Mare », l'un coiffant les évaporites périphériques (LM1), l'autre appartenant au ré-ennoisement marin post-crise (LM3) (Clauzon et al., 2005 ; Popescu et al., 2007, 2009 ; Do Couto et al., 2014). Dans les bassins centraux, des dépôts « Lago Mare » (LM2) clôturent la phase évaporitique (Sites 124, 371, 653, 654) en situation sous-jacente au réflecteur « M ».

Une étude biostratigraphique (coccolithes, foraminifères, dinokystes, pollens) a été réalisée à très haute résolution en encadrant le réflecteur « M » des sites 976 - 977 - 978 (Mer d'Alboran), 124 - 372 - 134 (Basin des Baléares), 653 - 654 (Mer Tyrrhénienne). Cette étude montre (1) la présence des trois épisodes « Lago Mare », (2) des lacunes sédimentaires de 0,5-1 Ma (érosion en domaine profond) et conduit (3) à des reconstitutions paléoenvironnementales et paléogéographiques robustes.

Clauzon, G., et al., 2005. Basin Research, 17, 437-462.

Do Couto et al., 2014, Marine & Petroleum Geology, 52, 57-76

Orszag-Sperber, F., 2006. Sedimentary Geology, 188-189, 259-277.

Popescu, S.-M., et al., 2007. Geobios, 40, 3, 359-373.

Popescu, S.-M., et al., 2009. Palynology, 33, 2, 105-134.

### 2.1.3 (o) Cartographie géologique du plateau continental et sismique marine très haute resolution en Manche : amélioration de la connaissance géologique du bassin de Paris

Fabien Paquet<sup>1</sup>, Isabelle Thinon<sup>1</sup>, Eric Lasseur<sup>1</sup>, Renaud Couëffé<sup>1</sup>,  
 Justine Briais<sup>1,2</sup>, Olivier Dugue<sup>3</sup>, Christian Dupuis<sup>4</sup>, François Guillocheau<sup>2</sup>, Florence Quesnel<sup>1,5</sup>, Cécile Robin<sup>2</sup>, Bernadette Tessier<sup>3</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>Géosciences Rennes

<sup>3</sup>M2C, Caen

<sup>4</sup>Faculté Polytechnique de Mons, Belgique

<sup>5</sup>ISTO, Orléans

La campagne MERCAUX 2013 d'acquisition sismique marine Très Haute Résolution s'est déroulée dans le cadre du projet de cartographie géologique du plateau continental français mené par le BRGM. Elle avait pour objectif d'obtenir une imagerie sismique détaillée du sous-sol afin d'améliorer la connaissance régionale de la bordure ouest du Bassin de Paris (Baie de Seine - Pays de Caux). Cette zone souffre en effet d'un déficit de données de subsurface à terre (sismique, puits) qui limite la connaissance de sa géologie régionale et de son évolution, notamment au cours du Méso-Cénozoïque.

La campagne MERCAUX 2013 a permis l'acquisition de 1600 km de sismique THR de bonne qualité dans le nord Baie de Seine et au large du Pays de Caux, faisant suite aux 3000 km acquis en Baie de Seine en 2007 et 2008 (Thèse BRGM-Université de Caen de M. Benabdellouahed, 2011).

Un exemple d'apport de connaissances est l'imagerie fine des géométries sédimentaires en ondulation de la craie (Coniacien-Santonien), visibles sur les falaises Etretat et Fécamp. Les données de MERCAUX 2013 permettent de déterminer l'extension géographique des champs

de ces géométries, de même que leurs dimensions et l'orientation des « levées » et « chenaux », ainsi que des courants impliqués dans leur formation.

Les données sismiques obtenues imagent l'ensemble des séries méso-cénozoïques jusqu'au remplissage complexe au sommet des séries du bassin tertiaire nord Baie de Seine. L'imagerie sismique a également montré son intérêt pour la caractérisation des déformations, et l'amélioration du schéma structural régional.

Les résultats de la campagne 2013 seront complétés par une campagne de prélèvements géologiques et d'acquisition sismique THR (MERCAX 2015) et intégreront la nouvelle carte géologiques de la zone Baie de Seine- Pays de Caux à 1 / 250 000ème.

### 2.1.4 (o) Amazon Basin drainage and river, a look into the past using seismic geomorphology, Marañon Basin - Peru.

Gerome Calves<sup>1</sup>, Ysabel Calderon<sup>1</sup>, Vincent Rosso<sup>2</sup>, Martin Roddaz<sup>1</sup>, Cédric Bonnel<sup>2</sup>, Stephane Brusset<sup>1</sup>, Patrice Baby<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>LFC-R, Pau

<sup>3</sup>IRD, Lima - Pérou

The aim of this work on seismic geomorphology of river and fluvial setting is to describe and discuss the aerial resolution at which we can detect fluvial features this to help calibration of reservoirs. We use for this three dimension seismic reflection, borehole data, digital elevation model and satellite imagery in the present day most important fluvial sedimentary system the foredeep basin of Marañon - Peru, part of the Amazonian Basin. Based on seismic stratigraphic principles on amplitude display we have tested parameters to highlights the details of the internal structure of horizon interpreted on continuous wavelets. Attributes such as amplitude, phase, sweetness and spectral decomposition technique have been successfully applied. The main results are a detailed analysis of a Cenozoic fluvial system that develops various geometries from straight, meandering and anastomosing channels. Ancient Marañon Basin rivers/streams size and shape is comparable to the observed in the present day fluvial setting of the Amazon Basin.

### 2.1.5 (o) Depositional environments and stratigraphic architecture of the Vaca Muerta Formation (South western Neuquén Basin)

Nesma Krim<sup>1,2</sup>, Cédric Bonnel<sup>2</sup>, Patrice Imbert<sup>1</sup>, Nicolas Tribouvillard<sup>3</sup>, Guilhem Hoareau<sup>2</sup>, Bertrand Fasentieux<sup>2</sup>, Charles Aubourg<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>2</sup>LFC-R, Pau

<sup>3</sup>Université Lille, UFR des Sciences de la Terre

The Vaca Muerta Fm. is one of the most prolific source rocks in the Neuquén Basin (southwest Argentina). It is Tithonian-Berriasian in age and consists of organic-rich, dark brown to black shales and mudstones deposited during a major transgression. The Tithonian-Berriasian interval was studied along the Picún Leufú Anticline (south part of the basin) through the analysis of nine sections. The geometry, spatial relationships and clay-mineral characterization were documented during this work to constrain the sedimentary evolution and its controlling factors. The close examination of the sections allowed us to characterize an evolution from a clastic-dominated ramp (Lower Vaca Muerta unit) to a mixed clastic-carbonate rimmed ramp (Upper Vaca Muerta unit). The

correlation of key markers and the vertical succession of facies associations enabled us to subdivide these two broad units into transgressive-regressive sequences (T-R sequences). The lower unit is constituted of an alternation of brown and grey laminated/massive silty outer ramp shales with storm beds and can be split into three T-R sequences. The upper unit is made up of two T-R sequences separated by a major unconformity and is mainly constituted by silty green outer ramp shales, with lagoonal and tidal deposits marking the shallowest environments. The clay-mineral assemblages are dominated by smectite and kaolinite with a stratigraphic evolution of these two minerals from the kaolinite (formed during periods of marked hydrolysis on land) to the smectite (typical of milder conditions of weathering).

This stratigraphic evolution of the clay minerals is interpreted to be related to the regionally well-known transition from arid to humid climate near the Tithonian-Berriasian boundary, as defined by Cuneo (2003). The passage from warm temperate to arid conditions is interpreted to have modified the terrigenous supply and marine conditions, thereby explaining the sedimentary evolution of the Vaca Muerta Fm.

### 2.1.6 (o) Impact du mode de propagation de la déformation sur la préservation des sédiments dans les bassins intra-montagneux : Cas des Andes de Neuquén (Argentine)

Cédric Bonnel<sup>1</sup>, Damien Huyghe<sup>1,2</sup>, Bertrand Nivière<sup>1</sup>, Grégoire Messenger<sup>1,3</sup>, Damien Dhont<sup>4</sup>, Yves Hervouët<sup>1</sup>, Jean-Paul Xavier<sup>4</sup>, Bertrand Fasentieux<sup>5</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau

<sup>2</sup>GET, Toulouse

<sup>3</sup>STATOIL (TPD RD), Bergen - Norvège

<sup>4</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>5</sup>Département Géosciences, Université de Pau et des Pays de l'Adour

Le bassin de Neuquén est un rétro-foreland de la chaîne andine dont l'inversion s'est initiée à la fin du Crétacé inférieur. A partir du Miocène l'avant-pays s'est compartimentalisé en plusieurs bassins intra-montagneux. Sa partie sud est divisée en deux bassins versants par la ride de Huincul (haut structural initié au Jurassique), celui du Rio Neuquén au nord drainant le bassin intra-montagneux d'Agua Amarga et le Rio Limay au sud qui draine celui de Collon Cura.

Dans ce travail, nous documentons la chronologie relative des événements géologiques et des processus sédimentaires qui ont mené au remplissage et à la vidange de ces bassins intra montagneux depuis 15Ma. Nous détaillons l'impact des modes de propagation de la déformation vers l'avant pays sur la préservation des sédiments dans la chaîne de montagne. Au nord de la ride de Huincul, un prisme orogénique s'est construit en se superposant à une déformation crustale, alors qu'au sud, le raccourcissement s'accommode exclusivement sur les failles crustales ant-orogéniques.

Après une période de déconnexion avec l'avant pays, caractérisée par une séquence aggradante évoluant d'environnements lacustres à des milieux fluviaux au sommet, les deux bassins vont subir une reconnexion différente. Au nord, la propagation du front de déformation vers l'avant a induit le soulèvement du bassin de l'Agua Amarga par rapport à l'avant-pays, permettant sa reconnexion à ce dernier par rééquilibrage du niveau de base des rivières puis sa vidange complète. Au sud, le bassin de Collon Cura est resté subsidant pendant sa phase endoréique. Ceci a permis une préservation des sédiments au sein du bassin intra montagneux et un transfert moins important de sédiment vers l'avant pays.

### 2.1.7 (o) Déformations Crétacé supérieur et Tertiaire (anté Thanétien) dans le bassin de Paris. Enregistrement à partir de la Craie

Eric Lasseur<sup>1</sup>, Justine Briais<sup>1,2</sup>, François Guillocheau<sup>2</sup>, Cécile Robin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans  
<sup>2</sup>Géosciences Rennes

L'intervalle Crétacé supérieur - Thanétien correspond aux premières phases de la convergence Afrique- Europe. Cette convergence s'enregistre par des déformations intraplaques en Europe, couramment différenciées en deux phases, une phase subhercynienne (Coniacien à Campanien) bien connue en Mer du Nord par des inversions de graben et une phase laramide (paléocène). La première phase est couramment considérée comme affectant uniquement l'Europe de l'est, à l'ouest du massif Londres Brabant. Des déformations et déplacements verticaux anté-Thanétien sont connus dans le pourtour du Bassin de Paris sur la base de l'enregistrement sédimentaire (lacune et émergence) et de données thermochronologiques (Morvan).

L'existence, l'âge et l'amplitude de ces déformations sont ici questionnés à partir de coupes à l'échelle du bassin, ainsi que de cartes d'épaisseurs et de faciès de la craie. Elles permettent d'identifier les déformations durant le Crétacé supérieur et de disposer de proxy pour estimer les amplitudes de déformations verticales via la distribution des épaisseurs de craie préservées vs érodées. Sont ainsi en évidence :

- Une flexure démarrant au cours du Coniacien marquant l'enregistrement de déformations grande longueur d'onde d'âge Crétacé supérieur.
- Une déformation Tertiaire, possiblement polyphasée (anté Danien et probablement anté Thanétien) scellée par le Thanétien, qui se caractérise par une accentuation et une migration de la flexure Crétacé supérieur. Cette déformation se caractérise par :
- une préservation maximale des dépôts au sud de l'accident du Pays de Bray,
- un soulèvement majeur dans la partie Nord au niveau de l'Artois qui traduit probablement une première phase d'inversion de l'ensemble Weald-Boulonnais,
- une préservation majeure très locale dans le bassin de Mons,
- un rejeu des failles de Bray et du système de l'Artois.

Le lien entre ces déformations et les différentes phases de la convergence Afrique Europe seront discutées.

### 2.1.8 (o) Intracratonic basins : subtle records of long wavelength deformations and eustasy - the case example of the paris basin

Cécile Robin<sup>1</sup>, François Guillocheau<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

Subtle vertical movements, major constraints for lithospheric and mantle dynamics models, are difficult to quantify and to date. In sedimentary basins, this quantification is based on subsidence measurements by backstripping. The error bars on this technique can be high, mainly in the low subsiding domains where dates, water depths and eustasy are important data.

We developed a 3D high-resolution method of accommodation space measurement at the scale of intracratonic basins, with a precise quantification of the water depth. Based on this 3D quantification of the accommodation, it was possible to discriminate the deformation and the eustatic controls based on the principle that the basin-scale signal contain the eustasy and the local control is of tectonic origin.

(1) The application of this technique to the Paris Basin questioned the importance of the long term subsidence signal versus major deformation events of at least European-scale (Mid and Neo-Cimmerian, Austrian,

Senonian deformations..) that control, in the Paris Basin, major subsidence centers reorganization.

(2) The stratigraphic record of the Paris Basin, with those excellent datings (inheritance of 2 centuries of biostratigraphy), is also a unique place for constraining eustasy, its timing (with now a good knowledge of the sea water temperatures since the Jurassic) and the order of magnitude of the sea level variations. Back, those sea level amplitude constraints can be inputs for a better quantification of the vertical movements.

### 2.1.9 (o) Major Late Triassic unconformity development in Central Atlantic basins ; what is the trigger ?

Sophie Leleu<sup>1</sup>, Adrian Hartley<sup>2</sup>, Dominique Frizon De Lamotte<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ENSEGID/ IPB, Pessac

<sup>2</sup>University of Aberdeen, Royaume-Uni

<sup>3</sup>GEC, Cergy-Pontoise

Processes and controls on Triassic rifting along the Atlantic margins have long been debated. Rifting follows Permian-early Triassic collapse of the Variscan orogeny and it occurs lateral to the opening of Neo-Tethys to the east. Seafloor spreading commenced during earliest Jurassic in the southern Central Atlantic and propagated northwards. It was initiated around early Mid Jurassic times in the Northern CA.

A synthesis of Triassic basin architectures for the CA domain shows a variability of structures. The southern basins (Georgia to Virginia) are small with subtle growth-structures and were truncated before the end of the Triassic. Basins in the Central-West domain (New Jersey to Nova Scotia) are wide with growth-structures developed along long-lived bounding faults. Basins in the Central-East domain (offshore NS and Morocco) have two basin-fill units, a lower small half-graben package and an upper very wide rather tabular unit. All basins display similar basin fill evolution with a continental sand-prone lower unit followed by an upper mud-prone unit of lacustrine and marginal marine environments. The end of the Triassic is marked by a major magmatic event (CAMP).

The Triassic rifting style is complex with the development of a broad rift zone of highly variable geometries. Formation of a wide rift system implies an initial thick crust, high heat-flow and slow strain. The timing of the magmatic event following a long rifting period suggests that the Triassic rifting is a passive rift initiated by lithospheric extensional stresses causing mantle uplift that eventually lead to magmatic production. In the southern basins, erosional truncation indicates a Late Triassic pre-CAMP uplift phase. We suggest that it is related to the onset of mantle uplift that triggered an uplift of land surface. Further to the north, a Late Triassic unconformity within the Nova Scotian and Moroccan basins might be related to large-scale pre-CAMP uplift of lesser amplitude northwards.

### 2.1.10 (o) Dynamique du manteau, topographie dynamique et contraintes lithosphériques à grande échelle depuis 400 Ma

Marianne Greff<sup>1</sup>, Jean Besse<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

Cette étude présente une modélisation de la topographie dynamique et des contraintes lithosphériques dans un repère lié à l'Afrique fixe depuis 400 Ma.

Nous avons tout d'abord modélisé la dynamique du manteau en étudiant les anomalies de masse dans le manteau induites par les subductions (en faisant l'hypothèse que les plaques plongent verticalement dans le manteau) et par des domes chauds dans le manteau profond. Pour cela, nous

avons reconstruit le mouvement des plaques et des zones de subduction depuis 400 Ma à partir de données géologiques, paléomagnétiques et volcaniques. Le volcanisme calco-alcalin étant étroitement lié au mécanisme de subduction, son existence ou non à une frontière de plaque nous a permis d'identifier des zones de subduction. Le volcanisme intra-plaque, lui, nous a permis d'identifier les deux larges zones à la surface de la Terre à l'aplomb de deux dômes antipodaux dans le manteau profond et en particulier de montrer que ces dômes, situés actuellement l'un sous la Polynésie et l'autre sous l'Afrique, semblent être stables depuis 400 Ma et proches de l'équateur magnétique.

Une fois construit ce modèle de variation temporelle des anomalies de masse de grande échelle spatiale (> 2000 km) dans le manteau depuis 400 Ma, nous avons calculé le géoïde, la topographie dynamique et les contraintes lithosphériques associés et les avons comparés avec des observations soit géodésiques, soit géologiques :

- le géoïde actuel calculé ainsi que les gradients de gravité sont en bon accord avec les observations satellitaires pour les grandes longueurs d'onde.
- depuis le Dévonien, la comparaison de nos résultats avec des observations géologiques en surface permet d'expliquer l'apparition de certains bassins en Amérique du Nord (Western Interior seaway) ou en Australie (mouvement vertical au Crétacé) ainsi que certaines zones d'extension en Afrique (rifts).

### 2.1.11 (o) Déformations très grandes longueurs d'onde de l'Afrique au cours du Cénozoïque

François Guillocheau<sup>1</sup>, TopoAfrica working group

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

The African continent is characterized by a bimodal topography. The 900-1100 m elevation peak mainly corresponds to the Southern African (Kalahari Plateau) and the East African Domes, whereas the 300-400 m peak is the mean elevation of the Sahara. Those reliefs are characterized by very long wavelength (x1000 km), similar to the scale of mantle dynamics. The origin of this relief, dynamic topography or more local controls (e.g. old lithospheric inheritance), are highly debated and more geological controls are required.

To answer those questions - in the frame of the TopoAfrica project - we performed a geomorphological study of Africa coupled with the tectono-sedimentary study of the sedimentary basins or the magmatism.

- (1) Most of the African reliefs are younger than the Early-Middle Eocene (55-40 Ma).
- (2) The only significative old relief of Africa is the Southern African Plateau that experienced a two steps evolution, a first uplift during Late Cretaceous contemporaneous with high erosion under humid climatic conditions, followed by a second uplift during Late Eocene - Early Oligocene. The present-day arid to semi-arid climate could explain its preservation.
- (3) Most of Africa is uplifted during Miocene times (20-10 Ma), age of most of the present-day reliefs.
- (4) The African magmatic provinces (Virunga-Kivu, Cameroon Volcanic Line, Hoggar, Aïr...) are associated with local uplifts that started around Late Eocene times (40-35 Ma).

The relationships of those reliefs with the migration of the African plate over the African superswell will be discussed.

### 2.1.12 (o) Lithospheric and crustal structure of the African continent constrained by elevation, geoid and geology data

Flora Bajolet<sup>1</sup>, Alexandra Robert<sup>1</sup>, Dominique Chardon<sup>2</sup>, Delphine Rouby<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>GET/IRD, Toulouse

The aim of our project is to simulate the long-wavelength, flexural isostatic response of the African plate to sediment transfers due to Mesozoic erosion - deposition processes in order to extract the residual topography driven by mantle dynamics. Our work will be based on the reconstruction and subtraction of two continental-scale erosional-depositional surfaces of Eocene and Late Cretaceous ages and their offshore extensions.

The first step of our project consists in computing crustal and lithospheric maps of the African plate considering its various crustal geological components (cratons, mobile belts, basins, rifts and passive margins of various ages and strengths). In order to consider these heterogeneities, we compute a 2D distribution of crustal densities and thermal parameters from geological data and use it as an input of our modeling. We combine elevation and geoid anomaly data using a thermal analysis, following the method of Fullea et al. (2007) in order to map crustal and lithospheric thicknesses. In this approach, we assume local isostasy and consider a four-layer model made of crust and lithospheric mantle plus seawater and asthenosphere. In addition, we compare our results with crustal thickness datasets compiled from bibliography, existing global models such as CRUST 1.0, and tomographic lithospheric models.

The obtained crustal thicknesses range from 30 to 45 km, with the thickest crust confined to the northern part of the West African Craton, the Kaapvaal craton, and the Congo cuvette. The crust in the East African Rift appears unrealistically thick (40-45 km) as it is not isotatically compensated, highlighting the dynamic effect of the African superswell. The thinnest crust (30-35 km) follows a central East-West trend coinciding with Cretaceous rifts and the Cameroon volcanic line. Pan-African mobile belts yield intermediate values of ca. 35-40 km. The lithosphere reaches 250 km beneath cratons, but remains globally thin (ca. 150-180 km) compared to tomographic models and considering the age of most geological provinces. As for the crust, the thinnest lithosphere is located in areas of Cretaceous-Jurassic rifting.

### 2.1.13 (o) Some consequences of the diagenesis of magnetic minerals in argillaceous rocks near oil window (~ 3 km depth)

Charles Aubourg<sup>1</sup>, Myriam Kars<sup>2</sup>, Jean-Pierre Pozzi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau

<sup>2</sup>Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, Nankoku, Japon

<sup>3</sup>Laboratoire de Géologie, ENS Paris

From early burial to lower greenschist grade, the formation of magnetic minerals obeys to relatively simple rules in argillaceous rocks ; greigite within the first meters of argillaceous Fm., magnetite from ~ 2 km up to 10 km depth, and finally pyrrhotite by 8 km~ (Aubourg et al., 2012). Focusing on the entry of oil window (~ 3 km depth, magnetite window), where kerogen starts forming, we discuss of several consequences like the application of a magnetic geothermometer MagEval, the magnitude of Koenigsberger ratio, the magnetostratigraphy record, and the fold test.

In source rocks, the neoformed magnetite is essentially nanosized and the finest fraction does not contribute to the net remanence of the sediments. This is the ratio between these minerals and those which are able to carry a remanence that is used for the MagEval geothermometer. This geothermometer works well near the oil window. One consequence of the abundance of nanosized magnetite is that the Koenigsberger ratio is pretty low at the entry of oil window. Formation of magnetite is a source of wrong magnetostratigraphy record. In particular, Aubourg et al. (2012) proposed that the recognition of successive chrons might

not be representative of a record contemporary of the sediments deposition. Generally, one way to test primary nature of the paleomagnetic record is to use the fold test. We propose that pre-folding paleomagnetic record indicates that kerogen starts forming in basin conditions. The post-folding record suggests that kerogen starts forming when folds are achieved. The syn-folding record results from the continuous formation of magnetic minerals during folding rather than the signature of a single event, like fluid circulation. If correct, a syn to post folding record might suggest that kerogen produced during burial can have more chances to be trapped in fold structure.

### 2.1.14 (o) Le Tebaga de Medenine, témoin d'un jeu transpressif permien supérieur-triasique le long de failles E-W au sud du môle de Matmata (bassin sud tunisien)

Camille Raulin<sup>1</sup>, Christian Blanpied<sup>1</sup>, Romain Bibonne<sup>2,3</sup>, Samir Bouaziz<sup>4</sup>

<sup>1</sup>TOTAL, Paris-La Défense

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>3</sup>Université Strasbourg

<sup>4</sup>Ecole Nationale d'ingénieurs de Sfax, Tunisie

Le nord-ouest du bassin Sud tunisien (région de Matmata), siège d'une puissante sédimentation marine au Permien, s'est soulevé à la fin du Paléozoïque. Une phase de déformation Permien terminal/Trias supérieur a en effet contrôlé la distribution des dépôts du Trias jusqu'au Vraconien. Toute la plate-forme a donc basculé vers le Sud, ce qui a engendré la mise en place d'un haut topographique, le môle de Matmata. Il est limité au sud par la structure affleurante paléozoïque du Tebaga de Médenine. Cette structure est-ouest, active pendant le Trias, a encaissé les contraintes et de fait limité la propagation de ce môle vers le sud. Les mises en place polyphasées du môle de Matmata et du Tebaga de Médenine ont été étudiées par le biais d'analyses structurales effectuées sur les séries permo-triasiques à l'affleurement et par le biais de l'interprétation de la sismique disponible. L'étude terrain s'est essentiellement focalisée sur le secteur nord du Tebaga de Médenine et sur les unités triasiques au centre du bassin Sud tunisien. Elle a permis de montrer que le redressement des unités permien en un monoclin à pendage sud-sud-est était principalement lié à d'importants mouvements décrochants transpressifs dextres le long d'accidents orientés E-W au niveau du Tebaga de Médenine, et NW-SE au centre du bassin Sud tunisien. Des petits plis et une faille inverse orientés nord-sud au sein des unités du Permien terminal ont par ailleurs été identifiés sur les profils sismiques au sud du Tebaga de Médenine. Ils sont la preuve qu'une nouvelle phase tectonique compressive est-ouest a eue lieu entre le Wordien et le Trias moyen. Le Permien moyen-supérieur du bassin Sud tunisien enregistre donc les premiers effets d'une nouvelle phase tectonique compressive.

Les structures compressives identifiées en sismique, et celles transpressives identifiées à l'affleurement, sont les témoins de la surrection du haut de Matmata dont l'origine tectonique reste à élucider.

### 2.1.15 (o) La terminaison orientale tunisienne du haut topographique de Talemzane, témoin des cycles tectoniques paléozoïques d'Afrique du Nord

Camille Raulin<sup>1</sup>, Christian Blanpied<sup>1</sup>, Samir Bouaziz<sup>2</sup>, Romain Bibonne<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>TOTAL, Paris-La Défense

<sup>2</sup>Ecole Nationale d'ingénieurs de Sfax, Département de Génie Géologique, Tunisie

<sup>3</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>4</sup>Université Strasbourg

L'Afrique du Nord est parcourue par un système complexe de bassins précambriens et paléozoïques interconnectés, superposés et séparés par des hauts topographiques qui sont restés stables pendant une grande partie du Phanézoïque. L'origine et le mode de déformation de ces hauts paléozoïques sont encore aujourd'hui controversés bien que généralement attribués aux grands cycles orogéniques calédonien et hercynien. Le bassin Sud tunisien est traversé par la terminaison orientale de l'un de ces hauts, le haut de Talemzane, actuellement enfoui sous une faible épaisseur de sédiments mésozoïques.

L'histoire géologique polyphasée de ce haut a été en partie décryptée grâce à l'étude combinée de profils sismiques et de nombreux forages. Elle a mis en évidence des variations d'épaisseur importantes et des failles qui ont fonctionné par intermittence pendant le Paléozoïque inférieur. Elles étaient associées à des événements extensifs rapportés à des contraintes intraplaques pour le Cambro-Ordovicien, et à l'ouverture de la Paléotéthys pour le Siluro-Dévonien. Ce haut paléozoïque, comme probablement l'ensemble des hauts paléozoïques d'Afrique du Nord, correspond donc à un vaste haut topographique faillé dans un contexte tectonique extensif.

Une discordance majeure entre le Paléozoïque inférieur et le Permo-Carbonifère a également été identifiée au sein du bassin Sud tunisien. Elle a été appelée discordance anté-Carbonifère. Elle serait la conséquence des phases extensives siluro-dévonien responsables du développement du haut de Talemzane, suivies d'une phase de quiescence tectonique et d'une érosion à la fin du Dévonien. Cette discordance a été suivie par de nouvelles phases extensives au Permo-Carbonifère qui se sont atténuées progressivement au Trias mettant un terme à la structuration du haut de Talemzane.

Les différents événements tectoniques qui ont été déduits de cette étude ont donc permis de confirmer ou infirmer certains des grands ou petits cycles tectoniques qui ont été étendus à l'ensemble de l'Afrique du Nord pendant le Paléozoïque.

### 2.1.16 (o) Facies, architecture et contexte géodynamique des bioconstructions à éponges sinémuriennes de Nzala (haut Atlas central, Maroc)

Imane Mannani<sup>1</sup>, Driss Chafiki<sup>1</sup>, Abdelallah Ait-Addi<sup>1</sup>, Ahmed Souhel<sup>2</sup>, Joseph Canérot<sup>3</sup>, Fatima-Zahra Ait-Itto<sup>1</sup>, Lahcen Daoudi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Géosciences et Environnement, Département de géologie, Marrakech, Maroc

<sup>2</sup>Département de Géologie, Faculté des Sciences, Université Chouaib Doukkali, El Jadida, Maroc

<sup>3</sup>GET, Toulouse

L'étude intégrée, cartographique, stratigraphique et biosédimentologique des bioconstructions sinémuriennes du flanc nord de la ride de Nzala, a permis d'apporter des éclaircissements nouveaux à leur histoire géologique.

La cartographie de l'intervalle bioconstruit montre une irrégularité géométrique de son toit, attestant d'une extinction diachrone. Le calage de cet intervalle sur la coupe de référence levée sur la rive gauche de l'oued Nzala (Chafiki, 2005), a permis de tracer des isochrones continues dans l'espace géographique. Il montre que ces constructions sont bien développées au passage Sinémurien inférieur-Sinémurien supérieur et évoluent très localement dans le Sinémurien supérieur pour disparaître définitivement à la base du Carixien inférieur.

L'étude biosédimentologique et architecturale permet de répartir ces

bioconstructions en trois ensembles :

- un ensemble inférieur (30 m) où les monticules carbonatés sont de forme simple, de petite taille et à éponges siliceuses ;
- un ensemble médian (45 m) qui montre des constructions de forme complexes et de grande dimension, à thrombolites et à éponges siliceuses ;
- un ensemble supérieur (90 m), massif et localisé dans l'espace, constitué par l'empilement de corps lenticulaires d'épaisseur métrique et d'extension décimétrique où les thrombolites et les éponges sont très rares, les coraux solitaires et les ammonites sont fréquents.

Le faciès monticulaire révèle des éponges calcifiées (hexactinellides, lithistides et des démosponges non rigides) qui supportent des croûtes thrombolitiques et des serpulidés (*Terebella*, *Serpula*) et des bryozoaires encroûtants. L'ensemble constitue une structure caverneuse de type framestone, associant l'allomicrite et l'automicrite.

Les caractéristiques sédimentologiques et paléontologiques des monticules de Nzala attestent d'un milieu marin profond sub-photique, à proximité de la zone à oxygène minimum et à la partie inférieure de la zone d'action des vagues de tempête.

L'apparition des monticules étudiés est associée à un changement de la morphologie du fond marin induit par la phase majeure de dislocation de la plate forme au passage Sinémurien inférieur-Sinémurien supérieur (Chafiki et al., 2004). Leur persistance dans le Sinémurien supérieur serait liée à la distribution irrégulière de la sédimentation ou à une croissance sur des substrats topographiquement élevés.

### 2.1.17 (o) Phosphate deposits of Maastrichtian-Lutetian age in Oulad Abdoun basin (Morocco). Sedimentology, mineralogy, geochemistry and silicification

Hamid El Haddi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Dynamics Sedimentary Basins and Geological Correlation, Faculty of Sciences Ben M'sik, Maroc

In Morocco, several occurrences of phosphates have been located in Upper Cretaceous - Paleogene sedimentary rocks. The silicification is mainly represented by silex, chert, opal and chalcedony. They usually form lenticular layers, asymmetric lenses, nodular and silicified rocks.

The major and trace element content of a representative set of sample was studied. The geochemical associations of SiO<sub>2</sub> and all the elements have remarkable relationship with the degree of diagenetic silicification. Their geochemistry was controlled by some factors : pH, environment of deposition, sediment particle size, topography, bathymetry and the upwelling currents. The host rock silicified mineralogy, and the types of phosphate series minerals, have high amounts of strontium and silicium related to organic matter and marine currents. They are comparable to those detected in phosphate deposits in Ganntour. In the deposits studied, silicification was provided organic substances (radiolarians and sponges) and secondarily by the dissolution detrital rocks.

### 2.1.18 (o) La transition mio-pliocène observée dans un bassin sédimentaire soumis à une tectonique forte : le bassin de Psématisménos-Maroni à Chypre

Ludovic Mocochain<sup>1,2</sup>, Christian Blanpied<sup>1</sup>, Carla Müller<sup>3</sup>, Sidonie Revillon<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Total E&P, Paris La Défense

<sup>2</sup>CV-Associés, Bayonne

<sup>3</sup>Retraîtée, Pologne

<sup>4</sup>IUEM, Plouzané

Les modalités de la crise de salinité messinienne font l'objet d'un consensus scientifique qui souligne l'existence de deux phases évaporitiques. La première n'affectant que les bassins périphériques, a donné lieu à des dépôts cycliques alternant gypses et marnes. La seconde phase correspond, quant-à elle, à la grande chute de 1500 m (5,6 à 5,45 Ma) responsable du dépôt d'épaisses couches d'anhydrites et d'halites dans les plaines abyssales méditerranéennes. Les bassins chypriotes figurent parmi les nombreux bassins périphériques étudiés en Méditerranée pour la compréhension de la crise, ce qui a donné lieu à plusieurs interprétations sur les modalités de l'évènement. Certaines d'entre elles allant jusqu'à rediscuter les conséquences ou l'existence de la grande chute, interprétant la surface d'érosion comme une conséquence de la tectonique locale. Dans le sud de l'île, le bassin de Psématisménos-Maroni montre plusieurs coupes qui permettent d'appréhender les modalités de la sédimentation depuis le Miocène supérieur jusqu'au Pléistocène. Grâce à l'apport de nombreuses datations (nannoplancton, Sr) il a été possible de proposer une interprétation du passage mio-pliocène dans un contexte de forte tectonique et d'oscillations du niveau marin. L'analyse géomorphologique et stratigraphique de ce bassin, contrainte par de nombreuses datations a permis de dégager un calendrier chronostratigraphique encadrant plusieurs phases tectoniques ainsi que la crise de salinité messinienne.

Jusqu'à présent, le dépôt de séries clastiques plus ou moins grossières dans les bassins chypriotes était systématiquement attribué à des phases tectoniques, dont la chronologie restait débattue dans la littérature. La multiplication des datations réalisées dans ce bassin et la comparaison de certaines séries sédimentaires de référence à l'échelle régionale nous a permis de faire la part entre l'eustatisme messinien et les conséquences de l'obduction dans l'enregistrement sédimentaire du bassin.

### 2.1.19 (p) Dualité entre eustatisme et polyphasage tectonique de l'accident majeur d'El Alia-Téboursouk au niveau des bassins Tertiaires de la région de Bizerte, Tunisie Nord-Orientale

Hamida Bejaoui<sup>1</sup>, Sabri Aridhi<sup>2</sup>, Fetheddine Melki<sup>1</sup>, Foued Zargouni<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géologie structurale et Géomatique, Département de géologie, Faculté des Sciences de Tunis, Tunisie

<sup>2</sup>Entreprise Tunisienne des Activités Pétrolières, Direction d'exploitation, Tunis, Tunisie

Les bassins tertiaires de l'extrême Nord-Est de la Tunisie (région de Bizerte) ont suscité l'intérêt de nombreux auteurs. Les études des séries du Mio-pliocène des bassins de Kechabta, Messeftine, El Alia, Jalta et Douimis ont fourni un scénario concernant l'évolution et l'inversion de subsidence connue à la fin du cycle du Miocène, et qui sont en étroite relation avec les compressions NW-SE de l'Eocène et du Tortonien.

L'interprétation des lignes sismiques, comparée aux données stratigraphiques et structurales au niveau des forages et des affleurements avoisinants, ont permis de proposer un modèle de plissement en pli de propagation de rampe, qui pourrait expliquer le mode de mise en place des structures anticlinales caractérisant la zone d'étude, et qui sont disposées préférentiellement de part et d'autre des rameaux de la faille d'El Alia-Téboursouk, orientés NE-SW.

### 2.1.20 (p) Le dévonien inférieur et moyen de Ben Zireg : lithostratigraphie, environnements de dépôts (Bechar, sahara algérien nord occidental)

Ahmed Hamza Fellah<sup>1</sup>, Abdelkader Oualimehadji<sup>2</sup>, Abderahmane Mekkaoui<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Bechar, Algérie

<sup>2</sup>Université d'Oran, Algérie

La région de Ben Zireg se situe dans la zone de transition entre l'Atlas saharien, au Nord, et la plate forme saharienne au Sud. Il s'agit d'une structure antiforme, orientée dans la direction Est-Ouest. Elle est constituée par des terrains paléozoïques, surmontés, en discordance angulaire, par le Mésozoïque. Par sa position géographique, Ben Zireg correspond à une zone charnière entre le Dévonien de Maider-Tafilalt (Anti-Atlas marocain) et celui du Km 30 et l'Ahnet (Algérie).

Sur le plan lithostratigraphique, le Dévonien inférieur et moyen est représenté par : (i) la formation des carbonates de l'Oued Khoufane (Lochkovien- Emsien sl) matérialisée par une alternance marno-argilo-carbonatée, (ii) la formation des silico-clastiques de l'Oued Khoufane (Emsien) (talus argilo-gréseux de Massa et al, 1963), (iii) la formation des carbonates de l'Oued des trois palmiers (Eifelien-Givetien), représentée par une alternance marno-calcaire à intercalations d'épisodes détritiques. La faune des trilobites (détermination MORZADEK) récoltée dans la partie médiane des carbonates d'Oued Khoufane confirme le Praguien moyen.

L'étude faciologique et le découpage séquentiel a permis de déceler deux séquences de deuxième ordre. La première (Lochkovien- Emsien sl) est régressive et comprend plusieurs séquences d'ordre inférieur, à caractère transgressif-régressif, évoluant depuis une plate forme distale vers un environnement proximal. La deuxième (Eifelien-Givetien) est transgressive, comme partout ailleurs sur la plate forme saharienne (Episode transgressif du Dévonien moyen).

La comparaison avec le Dévonien inférieur de km 30, de l'Ahnet et de l'Anti Atlas, nous a permis de détecter des domaines paléogéographiques différents : un domaine paléogéographique carbonaté dans l'Anti atlas et Ben Zireg et un autre domaine silico-clastique au km 30 et à l'Ahnet.

### 2.1.21 (p) Remplissage des bassins néogènes de la région d'Annaba (N.E. Algérie) en relation avec l'évolution de la chaîne alpine orientale

Menana Daiif<sup>1</sup>, Ahmed Arafa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Géodynamique et ressources naturelles, Université de Annaba, Algérie

Une série de petits bassins néogènes jalonnent la côte nord orientale de l'Algérie. Les formations étudiées affleurent entre Chetaibi et la Marsa et font partie d'un complexe volcano-sédimentaire. Ils sont formés :

- de marnes à forte fraction clastique.
- de grès, de microbrèches et de brèches à ciment peu abondant, à grains ou à éléments grossiers pouvant atteindre plusieurs mètres cubes, non classés, anisométriques, monogéniques ou polygéniques.

Ces roches sédimentaires, discordantes sur les formations antérieures, ne forment pas des unités bien individualisées mais présentent des alternances irrégulières avec comme faciès dominants des flyschs. L'ensemble peut atteindre plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Le caractère immature de cette sédimentation franchement détritique est attesté par :

- une structure hétérogène,
- des grains ou des éléments anguleux de granulométrie souvent grossière.
- un manque de tri minéralogique : les feldspaths sont sains et les micas assez bien conservés. Des roches magmatiques, acides et intermédiaires, sous forme massive et pyroclastique, viennent s'ajouter à l'ensemble.

Plusieurs caractères impliquent l'existence de reliefs importants, constamment rajeunis par une tectonique active en distension. Cette dernière est confirmée par de nombreuses failles normales dans lesquelles est injecté du magma. On assiste donc à une phase de relaxation et distension « post-nappe » caractérisée en particulier par des mouvements verticaux de réajustement. Les produits volcaniques sont très volumineux et couvrent une superficie de plus de 70 Km<sup>2</sup>. Ils peuvent provoquer une fracturation en profondeur, voire l'effondrement du toit de la chambre magmatique, créant ainsi des dépressions où auront lieu des incursions marines. Dans tous ces cas, la sédimentation, la tectonique et le volcanisme sont étroitement liés. Les zones où la sédimentation est la plus grossière correspondent au volcanisme le plus intense avec une fracturation plus importante.

### 2.1.22 (p) Caractérisation du passage Pliensbachien-Toarcién par étude de faciès et susceptibilité magnétique Haut Atlas Central, Maroc

Fatima-Zahra Ait-Itto<sup>1</sup>, Abdellah Ait-Addi<sup>1</sup>, Driss Chafiki<sup>1</sup>, Chokri Yaich<sup>2</sup>, Hocin Sefi<sup>2</sup>, Imane Mannai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géoscience et environnement, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, Maroc

<sup>2</sup>Laboratoire de dynamique sédimentaire et environnement, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Tunisie

Dans la partie axiale du Haut Atlas Central Marocain, le passage Pliensbachien-Toarcién est caractérisé par un changement brutal dans la sédimentation, matérialisé par le passage des alternances décimétriques marnes/calcaires à ammonites du sommet de la formation de l'Ouchbis, à une sédimentation monotone d'argiles et marnes à ammonites, admettant des intercalations de minces lits de calciturbidites de la formation de Tagoudite. Ce dispositif sédimentaire est le résultat de l'effondrement des plateformes carbonatées du Lias. Le Toarcién basal démarre au niveau des dernières alternances marno-calcaires de l'Ouchbis et se poursuit par une série épaisse de marnes admettant des intercalations de minces lits (5 cm) de calcaires gréseux à aspect onduleux et des intervalles de calcaires en plaquettes. Parfois, les niveaux calcaires sont riches en ammonites bien conservées.

Les données, des mesures de la susceptibilité magnétique (SM) couplées au dosage de CaCO<sub>3</sub> et aux analyses chimiques, nous ont permis une caractérisation préliminaire de ce passage. En effet, les valeurs de la susceptibilité magnétique sont relativement stables dans les alternances marno-calcaires du passage Domérien-Toarcién avec une moyenne de 3,41E-04, avec un enrichissement en éléments : Fe, Mg et Al. Les teneurs en CaCO<sub>3</sub> montrent des valeurs relativement élevées 34,84 % ; ce qui explique l'origine biogénique d'une grande partie des éléments des calcaires. Dans les dépôts du Toarcién basal, les valeurs de la SM varient selon la nature des faciès, et montrent des valeurs relativement faibles de l'ordre de 2,01E-04, couplées à une augmentation significative de la teneur en CaCO<sub>3</sub> 47,14%.

L'étude statistique des courbes linéaires de la SM et de CaCO<sub>3</sub>, montre une diminution de la SM, tout au long de la coupe avec des teneurs élevées de CaCO<sub>3</sub>, ce qui peut être lié à la transgression marine et à la subsidence du bassin survenues au Toarcién basal.

### 2.1.23 (p) Les apports de la biostratigraphie dans l'étude de l'évolution tectono-sédimentaire des bassins chypriotes. Quelques exemples sur la bordure méridionale du Troodos

Carla Müller<sup>1</sup>, Ludovic Mocochain<sup>2</sup>, Christian Blanpied<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Retraîtée, Pologne

<sup>2</sup>TOTAL, Paris-La Défense

L'île de Chypre est née de l'obduction du plancher océanique téthysien démarrée au Maestrichtien. Ce phénomène est responsable du soulèvement puis de l'émersion progressive des séries sédimentaires finimésozoïques et tertiaires déposées sur les ophiolites. Les grandes lignes de la chronologie des phases de cette obduction sont assez bien connues et contraintes par de nombreuses datations. Cette tectonique va impacter la sédimentation autour de l'orogénèse du Troodos en contrôlant à la fois la physiographie des espaces sédimentaires et la pétrographie des sédiments. Lors de nos investigations de terrain, près de 200 échantillons ont été prélevés dans l'intervalle sédimentaire recouvrant le Troodos dans le but de mieux contraindre la chronologie des événements géodynamiques impactant la sédimentation, depuis l'évolution des faciès sédimentaires jusqu'à l'apparition de discordances.

Les résultats obtenus par la biostratigraphie ont permis notamment de fournir une chronologie précise pour un certain nombre d'événements comme :

- la mise en place et la contemporanéité des grandes séries marnocrazeuses recouvrant le Troodos (formation de Lefkara) qui intervient entre la fin du Paléocène et le début de l'Eocène. Ces sédiments se trouvant systématiquement discordants sur les premiers termes de la série de Lefkara,
- dans le bassin de Psématisménos, la transition entre les séries crayeuses de Lefkara et les séries clastiques de Pakhna qui traduisent l'émersion progressive du Troodos,
- le passage entre le Miocène moyen et le Miocène supérieur et plus spécifiquement l'enchaînement de stades sédimentaires jusqu'au début de la crise de salinité messinienne.

### 2.1.24 (p) The marine Early-Miocene transgression in the central and eastern parts of the Sivas basin (Central Anatolia, Turkey)

André Poisson<sup>1</sup>, Roland Wernli<sup>2</sup>, Alessandra Negri<sup>3</sup>, Maria-Angela Bassetti<sup>4</sup>, Yesim Islamoglu<sup>5</sup>, Christian Chaix<sup>6</sup>, Sevim Tuzcu<sup>7</sup>, Charlotte Ribes<sup>8,9</sup>, Bruno Vrielynck<sup>10</sup>, Haluk Temiz<sup>11</sup>

<sup>1</sup>Univ. Paris-Sud, Sc. de la Terre, Orsay

<sup>2</sup>Univ. Genève, Dépt. Géol. et Pal, Suisse

<sup>3</sup>Univ. P. delle Marche, Dipt. Sc. del Mare, Ancona, Italie

<sup>4</sup>Univ. Perpignan, IMAGES

<sup>5</sup>MTA Genel Müd Marine Dept., Ankara - Turquie

<sup>6</sup>Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, France

<sup>7</sup>Ileri Sok, Ankara, Turquie

<sup>8</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>9</sup>LFC-R, Pau

<sup>10</sup>ISTeP, Paris

<sup>11</sup>Department of Geology, Cumhuriyet University, Sivas, Turquie

The Sivas basin is located in the collisional zone between the Pontides (southern Eurasia) and the Taurus (Gondwana basement). It suffered tectonic events during Paleogene and Neogene times. The deposition of evaporites in the central part of the basin during Late Eocene(?) - Early Oligocene times was followed by the formation of diapirs giving way

to salt tectonics during mid and Late Oligocene times. The basin became emergent at that time. The age of the marine transgression which invaded the basin is reappraised here on the basis of new data based on planktic and benthonic foraminifera, nannoplankton, molluscs and corals. Early Miocene has been characterised at the bottom of the transgressive pile especially in the algal limestones, (which represent a key level in the basin), due to the presence of miogypsinidae. The open-marine sites around the town of Sivas have delivered assemblages of planktic foraminifera of the Aquitanian, Aquitanian/Burdigalian (N4-5), Late Burdigalian/Langhian (N5-7), and, for the first time in the Sivas basin, possibly the Langhian (N8). The Aquitanian (MNN 1-2) was dated by nannoplankton near Caygören and above the coralgal reef of Uzuntepe to the SE of Sivas. Other sites present special assemblages of planktic foraminifera, or reworked nannoplankton material which does not give available stratigraphic attributions. These difficulties are related to the existence of restricted shallow-marine environments located to the south and separated from the Sivas open-marine marls by a coralgal reef barrier. The molluscs give suitable ages such as a pectinid (*Oopecten rotundatus*), which is a good marker of the Aquitanian in the Paratethys basins. In the areas of restricted marine environments the assemblages of gastropods are Burdigalian. The small benthonic foraminifera and the associated assemblages of ostracods are good indicators of the salinity which vary considerably in the restricted-marine sub-basins. Some of the corals are also Aquitanian.

### 2.1.25 (p) Evolution des environnements de dépôts dans le bassin du Tarim (Chine) au cours du retrait Paléogène de la Proto-Paratethys

Charlène Manceau<sup>1</sup>, Laurie Bougeois<sup>1</sup>, Jean-Noël Proust<sup>1</sup>, Guillaume Dupont-Nivet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

Du Crétacé supérieur à la fin de l'Éocène, la Proto-Paratethys, vaste mer épicontinentale, s'étendait à travers l'Europe et l'Asie Centrale. Au nord-ouest de la Chine, entre le plateau tibétain au sud et le Tian Shan au Nord, les sédiments du bassin du Tarim ont enregistré le retrait progressif de cette mer vers l'ouest suite à une succession de cinq grands épisodes de transgression-régression. Dans un contexte géodynamique et climatique particulier, lié à la collision entre l'Inde et l'Asie d'une part, et au passage d'un mode greenhouse à icehouse d'autre part, les causes, l'âge et les conséquences de ce retrait marin sont encore mal contraints. Si la datation des incursions marines paléogènes en Asie Centrale a suscité de nombreux intérêts, aucune analyse sédimentologique formelle et suffisamment détaillée n'a pour l'instant été réalisée pour contraindre les environnements de dépôts pendant le retrait marin. Ici, sédimentologie de faciès ainsi que stratigraphie séquentielle nous permettent de caractériser l'évolution des environnements de dépôt dans ce bassin au cours des trois incursions marines paléogènes. Nous avons ciblé notre étude sur trois coupes dans le Tarim ayant enregistré les incursions de la Proto-Paratethys : les sections de la Mine et Kansu à l'extrême ouest du bassin et la section d'Aertashi au sud-ouest. Bien que distants de plusieurs centaines de kilomètres, les incursions marines ont eu lieu de manière synchrone dans les différents sites, attestant qu'ils étaient ainsi connectés et ont subi une histoire commune. Cependant, des variations latérales entre milieux marins restreints et peu profonds au sud (Aertashi) et milieux marins ouverts et plus profonds au nord (Mine) sont observées dès le Paléocène, avant la collision Inde-Asie, jusqu'à l'Éocène supérieur. Cette dissymétrie au sein du bassin est probablement le témoin d'une topographie héritée des orogénèses précédentes (Plateau du Tibet au Sud, Tian Shan au Nord). Le retrait successif jusqu'à l'Eocène est interprété comme résultant de la combinaison d'une réactivation distal des reliefs au sud associée à la collision Inde-Asie et des

fluctuation du niveau marin global pendant la transition greenhouse à icehouse.

### 2.1.26 (p) Palaeogeographic and palaeotopographic evolution of the chinese tian shan during the mesozoic : A sedimentological synthesis

Gloria Heilbronn<sup>1</sup>, Cécile Robin<sup>2</sup>, Marc Jolivet<sup>2</sup>, Laurie Barrier<sup>3</sup>, Sylvie Bourquin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CASP, CB3 ODH, Royaume-Uni  
<sup>2</sup>Géosciences Rennes  
<sup>3</sup>IPG Paris

The Tian Shan range occupies the southwestern edge of the Central Asian Orogenic Belt. Our aim is to reconstruct the pre-Tertiary history of relief building in the Chinese Tian Shan. We use the sedimentary facies, sediment provenances and paleocurrent directions of the 6 exposed Mesozoic sections in the northern and southern piedmonts as well as in intra-mountain basins. The correlation of these 6 sections allows us to propose some palaeogeographic maps for the middle Jurassic, the upper Jurassic - lower Cretaceous transition, the upper Cretaceous and the late Cretaceous - Paleogene transition.

The dismantling of reliefs associated to the late-paleozoic tectonic phase is largely completed by upper Triassic. The Jurassic is characterised by a low tectonic activity and results in a general planation phase of the Tian Shan area. The upper Jurassic - lower Cretaceous transition is characterized by a huge conglomeratic event at the scale of all the northern foothills, associated with some eolian deposits implying an arid climate during this period. We propose that the alluvial fans are resulting from the erosion of relatively small and local reliefs, caused by normal faults activity, in contradiction with the existing hypothesis supporting compressional tectonic and reactivation of the range during the Upper Jurassic (Hendrix et al., 1992). However it fits to the interpretation of low thermochronology data. During the Upper Cretaceous, the widespread occurrence of alluvial fans indicates the ongoing erosion of a local positive topography in the Tian Shan area. A significant late Lower - early Upper Cretaceous unconformity is observable in the S-Junggar, N-Tarim and Turfan Basins. It is confirmed by low temperature thermochronology data that show a « major » late Lower Cretaceous unroofing event near Kuqa on the southern foothills (Dumitru et al., 2001) and some late Lower to early Upper Cretaceous exhumation ages within the range (Jolivet et al., 2010). This marks the onset of a new exhumation phase that goes on during the Upper Cretaceous and seems to stop after a peak of activity in the late Upper Cretaceous. Following the Upper Cretaceous inversion episode, a tectonic quiet period characterises the late Upper Cretaceous - Early Paleogene and enables the formation of a widespread calcrete in both piedmont of the range.

### 2.1.27 (p) Landscape and palaeo-landscapes of the Tarim active foreland basin (Xinjiang, China)

Amandine Dransart-Laborde<sup>1</sup>, Laurie Barrier<sup>1</sup>, Yves Gaudemer<sup>1</sup>, Martine Simoes<sup>1</sup>, Haibing Li<sup>2</sup>, Bihong Fu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>Laboratory of Continental Dynamics, Institute of Geology, Beijing, Chine

<sup>3</sup>Center for Earth Observation and Digital Earth, Beijing, Chine

Foreland basins are key areas to reconstruct the evolution of orogenic systems. They are shaped by the interactions between tectonics, climate,

sedimentation and erosion processes. Therefore, a better understanding of the relationships between these processes is necessary to improve our knowledge on landscape dynamics in compressive regions. We focus here on the characterization of the present-day and palaeo-landscapes in a foreland basin where deformation, sedimentation and erosion are still active and easily observable : the Tarim Basin located in Central Asia. The interest of this basin resides in outstanding outcrops of its sedimentary series and structures, numerous available subsurface data (seismic profiles and drilling well data), and its marked palaeogeographic changes. The methodology consists in coupling different approaches (geomorphology, sedimentology, sequential stratigraphy and structural geology) to characterize these palaeogeographic changes over space and time. As a starting point for this study, a morpho-sedimentological map of its present-day landscape was drawn from satellite images and digital topography. This map allows for characterizing the current drainage organization and associated sedimentary environments in the basin, and for comparing them with other foreland regions or with numerical models. A sedimentological analysis of field data is now in progress to reconstruct the spatio-temporal landscape evolution over the past 65 Ma. Moreover, a quantification of the different parameters (substratum deformation and sediment supply), which control this palaeogeographic evolution, will be independently constrained from a structural analysis of subsurface data. The obtained results should provide qualitative and quantitative constraints on landscape architecture and dynamics in continental foreland contexts.

### 2.1.28 (p) Evolution environnementale des Pyrénées orientales à l'Ordovicien Supérieur

Elise Nardin<sup>1</sup>, Alexis Lebon<sup>1</sup>, Markus Aretz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

Les strates de l'Ordovicien Supérieur sont très dispersées dans les Pyrénées. Elles sont formées par des roches détritiques alternant avec des roches carbonatées décalcifiées parfois fossilifères. Dans les Pyrénées orientales, l'Ordovicien Supérieur est délimité en sa base par une discordance parfois accompagnée par un conglomérat transgressif et en son sommet par un passage graduel vers les black shales siluriens, parfois distingué par un niveau gréseux. Ces marqueurs sont cependant moins francs dans le massif du Mouthoumet et dans les Pyrénées centrales, où s'expriment des faciès plus grossiers et plus carbonatés, respectivement.

Une étude sédimentologique détaillée, réalisée dans le cadre du RGF, des différentes unités de l'Ordovicien supérieur a permis d'estimer les paléoenvironnements et la géométrie de la plate-forme mixte pyrénéenne. L'approfondissement global semble diachrone entre le massif du Mouthoumet et Pyrénées Orientales, et les Pyrénées centrales ; ces deux unités ayant été probablement séparées par un paléorelief. L'Ordovicien supérieur du massif du Mouthoumet montre des dépôts gréseux et silteux fossilifères englobant une unité carbonatée fossilifère franche (shoreface supérieur et médian). Dans les Pyrénées orientales s'expriment des alternances silto-argileuses avec d'importantes variations de faciès (offshore supérieur). Les passages fossilifères correspondent principalement à des bioaccumulations de type tempêtes. Dans les Pyrénées centrales, l'Ordovicien supérieur est caractérisé par des alternances de quartzites et de passées silto-argileuses enfermant des lentilles carbonatées fossilifères, suggérant un environnement relativement distal avec des calciturbidites proximales. Les indices paléontologiques permettent d'attribuer les strates carbonatées ou décalcifiées au Katien moyen à supérieur.

### 2.1.29 (p) Evolution tectono-sédimentaire de la transition entre plate-forme silicoclastique externe et bassin profond à l'Est du bassin d'Ainsa à l'Eocène inférieur - Formation de Castisent (Aragon, Espagne)

Etienne Fayolle<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>2</sup>ENSEGID, Pessac

Le bassin d'Ainsa situé dans la Zone Sud Pyrénéenne, constitue un bassin d'avant-pays bien connu et étudié par de nombreux auteurs tels que Mutti et al. (1988), Millington et Clark (1995), Piking et Bayliss (2009), etc. Leurs études décrivent le fonctionnement de sous-bassins compartimentés par la progression vers l'ouest des chevauchements lors des différentes phases de l'orogénèse pyrénéenne. Cette étude se focalise sur la Formation de Castisent dans la partie Est du bassin d'Ainsa à proximité de l'anticlinal de Médianno. Cette dernière présente une polarité ESE-ONO : à l'Est dans le bassin de Tremp-Graus elle présente des faciès proximaux allant des systèmes fluviaux à la plaine deltaïque, et à l'Ouest dans le bassin de Jaca, partie distale de la formation, elle s'exprime sous forme de grands systèmes turbiditiques profonds. A partir d'un travail de terrain détaillé, nous avons reconstitué les profils de dépôt et l'évolution des paléoenvironnements au niveau de la transition entre la plate-forme silicoclastique externe, la pente et le bassin profond à l'Eocène inférieur (environs 7 Ma) entre les villes d'Ainsa et de Campo (Aragon, Espagne). L'objectif est de mettre en évidence de manière précise l'influence de la tectonique active synsédimentaire lors de la mise en place de la Formation Castisent : les nombreux chevauchements ayant joué dans le bassin affectent en effet les profils de dépôts et le remplissage des sous unités structurales. A travers une analyse séquentielle fine, cette étude vise à faire ressortir les relations entre les variations du niveau marin relatif et les différents cortèges sédimentaires afin de caractériser l'impact respectif des différents facteurs de contrôle sur la sédimentation : tectonique, variation des apports sédimentaires et eustatisme.

### 2.1.30 (p) Développement et inversion du bassin jurassique supérieur du Boulonnais (N de la France) : apport des affleurements côtiers

Olivier Averbuch<sup>1</sup>, Nicolas Tribouillard<sup>1</sup>, Ebraheem Hatem<sup>1</sup>, François Guillot<sup>1</sup>, Diane Vidier<sup>1</sup>, Sabrina Lefebvre<sup>1</sup>, Amélie Leduc<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Géosystèmes, Lille

<sup>2</sup>TOTAL, Paris-La Défense

Le Boulonnais correspond à un site géologique tout à fait remarquable dans le Nord de la France. On y a accès à l'ensemble sédimentaire le plus complet en bordure Sud du Massif du Brabant avec une série mésozoïque beaucoup plus épaisse qu'ailleurs dans la région. Cet épaississement, de l'ordre de plusieurs centaines de mètres dans le Boulonnais, est lié à l'existence de dépôts jurassiques d'âge Bathonien à Tithonien localisés par un système de failles normales de direction N110-120 et N020-030. Ce système de failles délimite au Jurassique un domaine subsidant en connexion vers l'ouest avec le bassin du Weald. Les dépôts jurassiques disparaissent aussi bien vers le Nord (Calais) que vers le Sud (Montreuil) ou l'Est (Artois) et ne réapparaissent qu'en sondage, à l'extrémité Sud de la région, se calquant ainsi sur la disposition cartographique en boutonnière du massif du Boulonnais. Dans les zones de lacune des dépôts jurassiques, on retrouve directement sur le substratum paléozoïque les séries crétacées supérieures (à partir de l'Aptien

supérieur) reposant en discordance (post-rift) sur une surface d'érosion majeure, d'âge fini-jurassique, associée localement à des dépôts continentaux du Crétacé inférieur (Wealdien). Les études structurales menées ces dernières années à terre et en mer, en Manche orientale, suggèrent que la géométrie en grand du Boulonnais peut-être interprétée comme un large demi-graben inversé, initialisé lors de la période de rifting majeur du Jurassique supérieur-Crétacé inférieur (rifting Nord Atlantique) puis surélevé et plissé en antiforme lors de la phase d'inversion alpine paroxysmale à l'Eocène Supérieur - Oligocène. C'est l'érosion de cette structure d'inversion tectonique positive qui a permis l'exhumation des séries jurassiques supérieures syn-rift. Ce scénario géologique sera argumenté et illustré à partir de l'analyse d'affleurements de Jurassique supérieur en plage et en falaise, le long d'un transect entre Boulogne et le Cap Gris-Nez.

### 2.1.31 (p) Evolution des connaissances sur la couverture méso-cénozoïque du plateau vendéen - apports de la campagne sismique SYRRE

Isabelle Thion<sup>1</sup>, Jean-Noël Proust<sup>2</sup>, Eric Chaumillon<sup>3</sup>, Fabien Paquet<sup>1</sup>, Vivien Baudouin<sup>1</sup>, Miguel Gonzales<sup>2</sup>, Thomas Guerin<sup>3</sup>, Chloé Guillon<sup>1,2</sup>, Mathieu Loquet<sup>1</sup>, Carlos Martillo<sup>2</sup>, Carole Ortega<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>Géosciences Rennes

<sup>3</sup>LIENSs, La Rochelle

La plateforme vendéenne est un secteur clé situé à la croisée de trois domaines géodynamiques : la bordure méridionale du Massif Armoricaire varisque affleurant à l'île d'Yeu et à Rochebonne, la bordure septentrionale du bassin d'aquitaine/bassin de Parentis (flexure « celta-aquitaine ») et la marge Nord-Gascogne qui a enregistré l'histoire du golfe de Gascogne. L'évolution du remplissage sédimentaire méso-cénozoïque et Plio-Quaternaire et la trame tectonique de la plate-forme continentale vendéenne sont mal connus. En 2005 et 2006, les missions de sismique réflexion Haute Résolution (GEOVEND, GEOVEND06, Géosciences Rennes-BRGM) ont permis de proposer une cartographie des unités sismiques des formations du Jurassique et du Crétacé (Huerta et al., 2008). Mais la synthèse cartographique Terre-Mer (Thion et al., 2013) a montré des zones d'incohérences cartographiques entre les cartes géologiques existantes.

La campagne supplémentaire de Sismique réflexion Très Haute Résolution, entre l'île d'Yeu, Rochebonne et l'île de Ré, SYRRE, a eu lieu du 7 au 17 Mai 2014, dans le cadre du projet « RGF-plateau continental »\* en collaboration entre le BRGM et les universités de Rennes et La Rochelle.

La densification du réseau sismique permet de préciser l'extension des bassins tertiaires et des dépôts du Crétacé supérieur et d'imager les géométries des surfaces majeures et des dépôts méso-cénozoïques pour déterminer les directions de progradation et en déduire les aires de subsidence. Elle apporte des éléments pour la reconstitution des paléogéographies du Jurassique au Tertiaire. Elles renseignent sur la répartition des structures, le style et le calendrier de déformation. Cette connaissance permettra d'obtenir une vision globale de la structuration et de la sédimentation du plateau continental vendéen dans le prolongement du plateau continental Sud-Bretagne.

Huerta P., Proust J.N., Guennoc P., Thion I. -2010- Seismic stratigraphy of the Vendée-Armorican Platform of the French Atlantic Shelf : new insights into the history of the North Atlantic Ocean. Bull. Soc. géol. Fr. , t. 181, no 1, pp. 37-50.

Thion I., Baudouin V., Paquet F., Conil P., Béchenec F., Le Bayon B.-

2013- Cartographie géologique harmonisée du littoral des Pays-de-la-Loire - BRGM/RP-62383-FR. 79p.

\* :appartient au programme de recherche et de cartographie Terre-Mer du territoire français du BRGM.

### 2.1.32 (p) Apport du retraitement sismique de données pétrolières marines 2D anciennes pour l'amélioration de la connaissance géologique profonde de la bordure septentrionale du bassin de Paris et de la Manche

Muhammad Toqeer<sup>1,2</sup>, Laure Capar<sup>2</sup>, Fabien Paquet<sup>2</sup>, Adnand Bitri<sup>2</sup>,  
 Isabelle Thinin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences Quaid-I-Azam university Islamabad,  
 Pakistan

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

La géologie profonde du Nord du Bassin de Paris est peu connue, en partie du fait d'un manque de données sismiques terrestres et de forages profonds. Contrairement au domaine onshore, le domaine offshore possède un jeu de données de sismique pétrolière importante aujourd'hui disponible au format brut (source BEPH). Si ces dernières années, des levés de sismique réflexion Haute Résolution et des prélèvements, effectués dans le cadre du projet « RGF-Plateau Continental » du BRGM en collaboration avec l'Université de Caen, ont permis de détailler les formations géologiques mésozoïques affleurantes (Benabdellouahed et al., 2014), seule l'étude des 100 mètres sous le fond-marin de la Baie de Seine est observable. Parmi les données disponibles, les profils sismiques pétroliers sont les rares données à offrir une image en profondeur de la bordure septentrionale du bassin de Paris et de la Manche méridionale. Leurs analyses renseigneraient sur la géométrie et l'épaisseur de la couverture sédimentaire, et le style des déformations.

Le projet GEONORMER financé par le BRGM avait pour objectifs d'établir une chaîne de traitement sismique moderne basée sur des outils en libre de droit pour traiter des profils 2D marins pétroliers des années 70-80 et de l'appliquer sur les données des campagnes 79MOE/79MOW et 80NCE.

Une chaîne de traitement sismique, mise en place sous Seismic Unix<sup>1</sup> pour ce type de données, est actuellement disponible (Toqeer et al., in prep.). Le retraitement se compose de trois parties : un contrôle qualité, un calcul des géométries et un traitement sismique jusqu'à la migration poststack voire prestack. Une attention toute particulière a été apportée à l'atténuation de bruits divers.

3015 km de profils sismiques pétroliers anciens dont 101 lignes sismiques ont été retraités. Ils mettent en évidence les structures et les discordances majeures jusqu'à 2.5 seconde temps double. Ces images permettront, après interprétation, une meilleure compréhension du Nord du Bassin de Paris.

### 2.1.33 (p) Deformations during uppermost Cretaceous-Early Eocene in NW Europe - The record of the Paris basin

Justine Briais<sup>1,2</sup>, François Guillocheau<sup>1</sup>, Cécile Robin<sup>1</sup>, Eric Lasseur<sup>2</sup>,  
 Olivier Serrano<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

The uppermost Cretaceous to Early Paleocene is, in NW Europe, a period of major deformations with significant inversions during Turonian to Campanian times and during Early Paleocene. The mechanism of those inversions is still debated. Later on, a major uplift coeval with the

Faroe-Shetland volcanic province occurred with a deformation regime still poorly understood.

The objective of this study is to better constrain those deformations in the Paris Basin and to discuss their implications on the palaeogeography and the sedimentary systems. This study is based on well-dated wells and outcrops, correlated using the technique of « stacking pattern ». In a second step, accommodation space measurements were performed from isopachs and facies maps.

(1) The paroxysm of the deformation and the sharp decrease of the subsidence occurred between Late Campanian (with probably deposition of part of the Maastrichtian) and Early Danian, with the growth of a middle wavelength fold controlled by the Bray Fault. Danian carbonate platforms, mainly preserved south-west of Paris, are growing on unstable slightly consolidated chalk (numerous slumps).

(2) A hiatus characterized part of the Danian, the Selandian and the base Thanetian.

(3) Thanetian initiate a major change of sedimentary system (siliclastic) and of subsidence pattern, now located north of the Bray Fault, above the Early Liassic highly subsiding domains.

(4) The Thanetian - Ypresian sediments do not record the eustatic signal, using the Zachos world sea temperature curve as a proxy (Haq's curve cannot be used anymore). This means that a significant deformation event overprints this signal, here the reactivation of the Seine Fault with inversion of some upper crust heterogeneities.

### 2.1.34 (p) Conditions de dépôt des séries péli-tiques de la formation FB de la bordure ouest du plateau de Bangombé, Bassin de Franceville, Gabon : Résultats préliminaires issus d'une nouvelle campagne de forage

Manon Dubois<sup>1</sup>, Michel Lopez<sup>1</sup>, Beate Orberger<sup>2</sup>, Florent Pambo<sup>3</sup>,  
 Sophie Rodrigues<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier

<sup>2</sup>Eramet-research, Trappes

<sup>3</sup>Eramet-Comilog, Moanda, Gabon

La formation FB (2.1 Ga) du Francevillien au sud-est du Gabon comprend une série de pélites noires qui portent le protore du gisement de manganèse supergène de Moanda. C'est également au sommet de cette formation qu'ont été découverts les plus vieux fossiles multicellulaires, sans que pour autant la communauté scientifique se soit accordée sur le modèle de dépôt.

Les résultats préliminaires de l'étude de 8 forages carottés, réalisés par la COMILOG dans la partie médiane de la série sur la bordure ouest du Plateau de Bangombé, permet de préciser les conditions de dépôt. A la base, l'Unité 1 (30 m) montre une alternance de siltites argileuses et de grès fins à moyens à fraction mixte silicoclastique et carbonatée. Les grès présentent des figures de charges, des convolutes et des rides de courant qui marquent des processus de décantation en domaine pro-deltaïque soumis à l'influence périodique de courants de fond en provenance des marges du bassin. L'unité 2 (30 m) est composée d'argilites silteuses noires recoupées par des lamines de grès très fins. L'augmentation de la fraction argileuse et organique indique le confinement du système qui est dominé par la décantation combinée à des apports par des courants néphéloïdes en domaine profond. L'unité 3 (100 m) est essentiellement composée d'argilites faiblement silteuses noires riches en carbonates de Mn et en pyrite micrométrique. La lamination souligne un feutrage algo(?)-bactérien associé à des structures fenestraes. Ce faciès peut contenir des passées plus silteux pluri-centimétriques de grès à rides de courant rebroussées qui soulignent l'existence de courants de fond cisailants en domaine profond suboxique à anoxique. La présence

d'injectite dans cette unité témoigne d'un fort taux de sédimentation. Au sommet, l'unité 4 (20 m) est composée d'une succession de niveaux de grès microconglomératiques à fins granoclassés à galets mous interprétés comme de chenaux sous-marins.

### 2.1.35 (p) Sédimentologie de la matière organique dans les bassins profonds : cas de l'Eocène dans le bassin Arctique

Chloé Le Gouche<sup>1</sup>, Cécile Robin<sup>1</sup>, Jean-Luc Auxière<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes  
<sup>2</sup>TOTAL, Paris-La Défense

La prédiction des roches mères sur la partie distale des marges (domaine profond et domaine ultra profond) est mal maîtrisée car l'origine, les processus de dépôts, et les mécanismes de préservations dans le temps de ces roches mères sont encore mal compris. Le climat, l'environnement de dépôt ainsi que le contexte océanique auront de toute évidence une forte influence sur les modes de transport et le dépôt de la matière organique et des argiles dans les bassins profonds.

Le premier constat est que la matière organique déposée dans les bassins profonds est généralement d'origine continentale (type III). Quels sont les modes de transport, de dépôt et de préservation de cette matière organique ?

Afin de comprendre ces processus, l'Eocène est idéal car il a enregistré un cycle climatique complet composé de l'optimum climatique Paléocène-Eocène (PETM) ainsi que de l'initiation de l'« icehouse » à l'Eocène (niveau Azolla). Le bassin Arctique est parfait pour cette étude, en effet il n'a subi aucune transformation géodynamique majeure et était quasiment isolé pendant tout le Tertiaire, l'enregistrement des événements climatiques et environnementaux (variations du niveau marin, passage d'un environnement chaud et humide à un environnement plus froid...) sont très bien marqués dans les séries sédimentaires, notamment dans les sédiments des deltas de la MacKenzie (Canada) et de la Lena (Russie). Ces grands deltas ont particulièrement bien enregistré les variations du niveau marin relatif, notamment dans leurs géométries sédimentaires. Leur étude est d'un grand intérêt puisqu'ils constituent une étape majeure dans le transport des sédiments depuis le continent jusqu'au bassin. Les deux deltas arctiques étudiés se sont construits depuis le début du Tertiaire dans un contexte géodynamique stable, l'enregistrement sédimentaire s'est donc fait de façon quasi-linéaire depuis Paléocène.

L'étude des caractéristiques sédimentaires et géochimiques de ces dépôts ainsi que leur cyclicité permet de faire le lien entre les événements climatiques et les dépôts d'argiles et de matière organique continentale ainsi que leur distribution spatiale dans le bassin. Cette étude est la première étape dans la construction de coupes régionales onshore-offshore. A partir de ces coupes il sera possible de proposer un modèle des processus de transport et de dépôt de la matière organique du continent au bassin profond.

### 2.1.36 (p) Late Neogene Sequence Stratigraphic Evolution of the Amazon River Mouth Basin, Brazil

Alberto Cruz<sup>1</sup>, Christian Gorini<sup>2</sup>, Bilal Haq<sup>1</sup>, Tadeu Dos Reis<sup>3</sup>,  
 Cleverson Guizan Silva<sup>4</sup>, Didier Granjeon<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Université Pierre et Marie Curie, Paris  
<sup>2</sup>iSTeP, Paris

<sup>3</sup>Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brésil

<sup>4</sup>Universidade Federal Fluminense, Gragoatá, Brésil

<sup>5</sup>IFP Energies Nouvelles, Solaize

The margin of the Amazon River Mouth Basin saw a shift from predominantly carbonate to siliciclastic sedimentation in the early late Miocene. By this time the Amazon shelf had also been incised by a canyon that allowed direct influx of sediment to the basin floor, thus confirming that the paleo-Amazon fan had already initiated by that time (9.5-8.3Ma). Above this interval, during a prolonged lowstand, Messinian third-order sequences are preserved only in the incised-valley fills of the canyon with no equivalent strata on the shelf. Third and fourth-order sequences younger than Messinian are preserved on the shelf after sea-level rise above the shelf by early Pliocene. Sequences younger than 3.8 Ma often show fourth-order cyclicity with average duration of 400 kyr (larger scale eccentricity cycles) often preserved in high sedimentation rate areas of river deltas. Mass wasting and transportation of slope sediments to the basin began to play an important role in sediment dispersal at least as far back as mid Pliocene, after rapid progradation had produced steeper slopes more prone to failure.

### 2.1.37 (p) Nouvelles données géologiques à Port-au-Prince, République d'Haïti. Vers un modèle de faciès en contexte de marge active

Anne Bialkowski<sup>1</sup>, Monique Terrier<sup>1</sup>, Claude Prépetit<sup>2</sup>, Yves-Fritz Joseph<sup>3</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>Bureau des Mines et de l'Energie, Port-au-Prince, Haïti

<sup>3</sup>Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics, Port-au-Prince, Haïti

Suite au séisme dévastateur du 12 janvier 2010, de magnitude 7,1, dont l'épicentre se situerait au SO de l'île d'Hispaniola, dans la baie de Port-au-Prince, un projet de microzonage sismique des principales villes de la République d'Haïti a débuté en 2011, en partenariat entre le BRGM, le Bureau des Mines et de l'Energie et le Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics, organismes publics haïtiens. Les microzonages sismiques doivent permettre de mieux prendre en compte le risque sismique dans la politique d'aménagement des villes. Une étude géologique des terrains de la capitale Port-au-Prince a été menée en 2012, première étape pour évaluer les formations superficielles (nature lithologique, épaisseur, géométries), leurs relations avec le substratum rocheux et la caractérisation des failles, potentiellement actives.

Concernant Port-au-Prince, jusqu'alors les données géologiques disponibles étaient le levé géologique de l'ensemble de l'île à l'échelle 1/250 000 réalisée dans les années 80 et une carte préliminaire géotechnique réalisée immédiatement après le séisme. Dans ce projet, plusieurs dizaines d'affleurements ont été observés, complétés par l'analyse des forages géotechniques, des photographies aériennes et images SPOT et du MNT (pas de 2 m calculé à partir des images Pléiades, projet KalHaïti, SERTIT/CNES). Les dépôts identifiés, du Miocène au Quaternaire, sont composés essentiellement de carbonates fortement remobilisés (turbidites, debris flow) issus de l'érosion du Massif de la Selle au Sud et de la mise en place du bassin d'avant-pays, où se situent Pétionville sur les hauteurs et Port-au-Prince dans la Plaine du Cul-de-Sac. Ces formations sont tributaires d'un contexte tectonique particulièrement actif (collision entre la plaque Nord-américaine et la plaque Caraïbes, failles N80°E du système de failles actives Enriquillo-Plantain Garden et N110°E).

Au-delà des difficultés inhérentes au terrain en milieu urbain, dans un contexte d'érosion active et de reliefs particulièrement accentués, les différents faciès observés ont été repositionnés dans un cadre chronostratigraphique. L'étude tectonique et morphologique indique des mouvements quaternaires senestro-inverses de plusieurs failles N110 cartées au niveau de la capitale. In fine, un modèle de dépôts gravitaires en contexte de marge active est proposé.

### 2.1.38 (p) Factors controls on the thermal evolution of slope basins of the Hikurangi subduction wedge, north island, New Zealand

Pierre Malié<sup>1</sup>, Sébastien Potel<sup>1</sup>, Julien Bailleul<sup>1</sup>, Frank Chanier<sup>2</sup>, Vincent Caron<sup>3</sup>, Geoffroy Mahieux<sup>3</sup>, Vincent Crombez<sup>4</sup>, Yannick Vautier<sup>1</sup>, Andy Nicol<sup>5</sup>, Brad Field<sup>5</sup>, Rafael Ferreira-Mahlmann<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais  
<sup>2</sup>Géosystèmes, Lille

<sup>3</sup>University of Picardie Jules-Vern, Amiens

<sup>4</sup>IFP Energies nouvelles, Rueil-Malmaison

<sup>5</sup>GNS Science, Lower Hutt, Nouvelle-Zélande

<sup>6</sup>Institut für Angewandte Geowissenschaften, Darmstadt, Allemagne

The thermal evolution of sedimentary basins in complex domains (i.e., orogenic wedges) is difficult to assess because of : 1) the low resolution of some thermo-barometric methods for low temperatures (e.g., T<sub>max</sub>), 2) the absence of well constrained correlations between the different methods, and 3) the high number of geological parameters that may influence each individual determination (e.g., sedimentation and burial history, structural development of the orogenic wedge, faulting and associated fluid circulation, lithology, ...). This is especially the case for accretionary prisms that are associated with very low heat flows and are generally submerged. The Hikurangi prism in the North Island of New Zealand, which is generally considered to have developed during subduction of the Pacific plate under the Australian plate since 25 Ma, is partially emergent and therefore constitutes an excellent, accessible analogue. The highest part of the accretionary wedge outcrops in the Coastal Ranges, and permits high resolution sampling of Neogene trench slope basins and their Cretaceous to Oligocene basement. Our goal is to improve understanding of the relationship between sedimentary basin fill, deformation, fluid circulation and thermal evolution. From previous work we have a good understanding of the tectono-stratigraphic evolution of the Coastal Range, and we present our first thermo-barometric data, allowing comparisons between Illite and chlorite crystallinities, and organic matter characterisation (vitrinite reflectivity and T<sub>max</sub>). The resolution of our sampling enables the local influence of individual faults on exhumation and uplift to be tested. A particular focus of this poster is examining the influence of thrust-nappe emplacement on the thermal evolution of Neogene turbidite basins. Our study has implications for de-risking estimates of maturation in hydrocarbon exploration in such complex domains.

### 2.1.39 (p) Low-grade metamorphic study based on *Árkai* Index and *Kübler* Index correlation in Markstein basin (Southern Vosges, NE France)

Anta-Clarisse Sarr<sup>1</sup>, Marine Maillet<sup>1</sup>, Delphine Chassagnac<sup>1</sup>, Mathilde Laffay<sup>1</sup>, Sébastien Potel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais

The Markstein basin, located in the Southern Vosges (France), was formed during the Variscan orogeny. It is mostly filled with viséan pelites and sandstones containing elements of volcanic origin. Several tectono-stratigraphic studies were carried out in this area, with a raw estimation on the metamorphic pattern. Krecher (2005) has considered that the basin was affected by a low-grade metamorphism, reaching at maximum the stage of anchizone associated with a temperature of 100-200°C (inferring diagenetic conditions), whereas Petrini and Burg (1998) considered that basin was affected by regional metamorphism (biotite zone) and contact metamorphism (400-600°C) with coeval regional deformation.

Our low-grade metamorphic study in the Markstein basin combined several methods based on mineral paragenesis and mineral reaction progress of phyllosilicates. *Kübler* Index and *Árkai* Index (KI and *ÁI* respectively) as K-white mica b cell dimension measurement were performed on 70 samples. In addition, chlorite geothermometer was used on some samples. KI and *ÁI* values show that most of the sediments have reached the stage of epizone. K-white micas b cell dimension are in the range 9.00-9.04Å, which correspond to an inferred geothermal gradient of 25-35°C/km. First results further to the south in the Giromagny basin (Southern Vosges) indicated lower metamorphic conditions. This study also underlines that high proportion of albite in samples could be a controlling factor on the evolution of KI and *ÁI*.

### 2.1.40 (p) Genetic role of geodynamics, stratigraphy and diagenesis on fracture corridors in reservoir analogues

Sébastien Chatelée<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

Fractures in sedimentary rocks have a large influence on the development of subsurface reservoirs, particularly in carbonates. About 85% of carbonate reservoirs are Naturally Fractured Reservoirs (NFR) and 30% of the world's hydrocarbon reserves are stored in NFR. All reservoirs should be considered fractured unless proven otherwise. However, fractures are often a priori ignored in reservoir development because they are highly heterogeneous and occur often below the seismic resolution. Therefore, NFR are studied on analogues with good 2D to 3D exposures for a quantitative analysis which provides data for generating Discrete Fracture Networks (DFN) to be used in reservoir flow simulations. Among fractures, Fracture Corridors (FC) are anomalous structures made of perennial fracture clusters that have a strong effect on multi-phase fluid flow in the subsurface. While mechanical and geological conditions for diffuse fracture systems are well constrained, FC genetic conditions remain a matter of questioning. FC can be localized in larger structures such as folds and fault zones but recent studies suggest that a large amount of fractures and FC also arise as diffuse in the host rock and formed in tabular layers during burial with early rock mechanical differentiation. In addition, while the mechanical stratigraphy is of prime importance for fracture stratigraphy, it is still unknown which factor prevails on FC genesis among the local versus regional stress-state, the host rock mechanical stratigraphy or the sedimentary facies. To unravel these questions, we present an input from an analogue study conducted in the quarry of Calvisson (SE France). This quarry exhibits Hauterivian marly limestones in a 400 × 300 m wide quarry with 16 FC. Their average width is 5.5 m and average spacing between FC is 16.5m. There, FC and diffuse fractures were formed during burial (maximum burial depth of 1500 m during Albian and prior to tectonic inversion and unloading). We show an important heterogeneity of the internal structures of FC. We distinguish seven types of internal morphology, depending on fracture morphology, occurrence of breccia and number of zones in the FC). We noticed no impact of the facies neither on FC occurrence nor on morphology. This study addresses questions on lateral extension of FC, predictability of the variability within FC and on the change of diffuse fractures close to the FC. Answering this question is a challenge of prime importance for FC modelling in subsurface.

### 2.1.41 (p) Discontinuity surfaces in Antillean shallow marine carbonates adjacent to active submarine volcanoes (Lutetian-Bartonian limestones, St. Bartholomew, French West Indies)

Vincent Caron<sup>1</sup>, Geoffroy Mahieux<sup>1</sup>, Julien Bailleul<sup>2</sup>, Frank Chanier<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Géosystèmes, Amiens*

<sup>2</sup>*Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais*

<sup>3</sup>*Géosystèmes, Lille*

Volcanic activity adjacent to shallow marine environments influences the development of ecosystems and their carbonate-producing communities. Volcaniclastic influx in particular has potential to cause drastic environmental changes affecting biological systems in their composition and activity, and leading to changes and breaks in carbonate sedimentation. These modifications are likely to be marked by facies changes and discontinuities. The Island of St. Bartholomew exposes sections of Middle Eocene limestones intercalated between thick volcaniclastic deposits and lavas. The carbonate depositional system is interpreted as an unrimmed tropical carbonate ramp dominated by chlorozoan, chloralgal, foralgal, rhodalgal and echinofor associations. This mixed carbonate volcaniclastic system records the repeated collapse and renewal of carbonate production, and provides an excellent opportunity to characterize discontinuities and discuss their origin. Termination, Foundering and Internal discontinuities are distinguished that represent the demise, rebirth, and discontinuous development of carbonate platforms, respectively. Whereas the termination surfaces relate to the input of volcaniclastics following either eruption or relative sea-level fall and subsequent burial of carbonate factories, foundering surfaces originate in reduced or arrested volcaniclastic input combined or not with marine flooding. Internal surfaces result from environmental changes of volcanic, autogenic (shoal migration) and allogenic (relative sea-level changes) origin that translated into erosion, shifts in biotic communities, emersion and omission. This study demonstrates that some discontinuity surfaces of volcanic origin may resemble those of tectonic-eustatic origin (e.g., omission firmground surfaces), and as such deserve attention since they may lead to misinterpreting carbonate successions and their stratigraphic patterns in a cyclostratigraphic and/or a sequence stratigraphic context.

## 2.2 Mouvements verticaux et bilan des flux sédimentaires à l'échelle des marges (ASF, affiliée au programme CNRS/INSU Actions Marges)(transverse thème 1)

### Vertical displacements and sedimentary fluxes in passive margins (ASF, associated to CNRS/INSU program Actions Marges)

#### Responsables :

- Olivier Dauteuil (Géosciences Rennes)  
olivier.dauteuil@univ-rennes1.fr
- Gérôme Calvès (GET, Toulouse)  
gerome.calves@get.obs-mip.fr
- Cécile Robin (Géosciences Rennes)  
cecile.robin@univ-rennes1.fr
- Olivier Broucke (Total, Paris)  
olivier.broucke@total.com

#### Résumé :

Ces dernières années, de nombreuses études ont démontré l'importance des mouvements verticaux sur les marges passives, bien après leur stade rift. Il a ainsi pu être montré des phases de subsidence et d'uplift. Les causes de ces mouvements sont encore largement discut es depuis la dynamique mantellique jusqu'au « ridge-push » en passant par le réajustement induit par les transferts de matière en surface. La quantification de ces mouvements, leur distribution spatiale et leur occurrence temporelle sont des enjeux majeurs pour comprendre la dynamique et l'évolution des marges ainsi que le couplage des processus agissant sur une marge depuis l'amont continental subissant une érosion jusqu'au dépôt en aval. Les enjeux économiques associés à ces mouvements verticaux sont fondamentaux : en effet ils contrôlent, entre autres, la localisation des réservoirs, des placers et la circulation des fluides. Les méthodes de quantification 1D et 2D de ces déplacements se fondent (1) sur la géomorphologie quantitative et les méthodes de thermochronologie pour les domaines continentaux en érosion, (2), la stratigraphie sismique et les mesures de flux sédimentaires terrigènes pour les domaines avals en sédimentation. Ces méthodes nécessitent de connaître l'eustatisme et le climat.

Cette session sera donc consacr e à l'analyse des mouvements verticaux affectant les marges passives et aux bilans des flux sédimentaires induits par ses mouvements ; ceci afin de mieux caractériser les facteurs de contrôle tectoniques ou climatiques de l'enregistrement sédimentaire de ces marges. La session sera également ouverte aussi aux études similaires effectu es dans les marges actives.

#### Abstract :

Recently, numerous studies have revealed complex fields of vertical displacements occurring long time after the continental breakup. These include both classical subsidence associated to tectonic and thermal adjustments, accelerated subsidence and uplift. The processes driving these vertical dynamics are largely debated : from deep mantle dynamics to ridge-push and to isostatic adjustment induced by solid mass transfers at surface. The main challenges are to constrain and estimate the amount vertical displacements, where and when they occurred, in link with the evolution and the process feedback acting in passive margins from continental to oceanic domains. The knowledge of these displacements has economic impacts : they control the location of reservoirs, placers and the dynamics of the fluid migration. The quantification of these displacements needs to use i) geomorphic methods and thermochronology in continental domains and ii) seismic stratigraphy and estimates of detrital fluxes in oceanic areas. Eustatic and climatic constrains had to be included the devoted studies.

This session is focused on methodological and applied studies dealing with vertical displacements occurring along passive margins and about sedimentary fluxes from continent to ocean in order to better constrain the tectonic and climatic parameters acting on sedimentary records. The session is also opened to active margins.

## 2.2.1 (o) Quantification de la subsidence et du réajustement isostatique messinien à partir de paléomarqueurs sédimentaires : exemples en Méditerranée Occidentale

Marina Rabineau<sup>1</sup>, Estelle Leroux<sup>1,2,3</sup>, Romain Pellen<sup>3</sup>, Daniel Aslanian<sup>3</sup>, Stéphane Molliex<sup>4</sup>, Christian Gorini<sup>1</sup>, Maryline Moulin<sup>3</sup>, Francois Bache<sup>5</sup>, Laurence Droz<sup>1</sup>, Tadeu Dos Reis<sup>6</sup>, Jean-Loup Rubino<sup>7</sup>, Francois Guillocheau<sup>8</sup>

<sup>1</sup>LDO, Plouzané

<sup>2</sup>iSTeP, Paris

<sup>3</sup>IFREMER, LGG, Plouzané

<sup>4</sup>IFREMER, LES, Plouzané

<sup>5</sup>Santos Ltd Opportunity Capture, Australie

<sup>6</sup>UERJ, Rio de Janeiro, Brésil

<sup>7</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>8</sup>Géosciences Rennes

Passive margins are characterised by an important tectonic and thermal subsidence, which favours a good preservation of sedimentary sequences. This sedimentation in turn enhances the subsidence because of loading effects. We present here a direct method based on sedimentary markers seen on seismic data, to evaluate total subsidence rates from the coast to the outer shelf and to the deep basin in the Gulf of Lion, from the beginning of massive salt deposition up to present day (the last circa 6 Ma) with minimal theoretical assumptions.

On the shelf, the Pliocene-Quaternary subsidence shows a seaward tilt reaching a rate of 240 m/Ma ( $\pm 15$  m/Ma) at the shelf break (70 km from the present day coastline) (i.e. a total angle of rotation of  $0.88^\circ$  ( $0.16^\circ$ /Ma)). We also quantified for the first time the Messinian salinity crisis isostatic rebound of the outer shelf. This value is reached up to 1.3 km of uplift during the crisis around the Hérault-Sète canyon heads (around 1.8 km/Ma). On the slope, we also find a seaward tilting subsidence from Km 90 to Km 180 with a measured angle of  $1.41^\circ$ . From 180 Km to the deepest part of the basin, the total subsidence is then almost vertical and reaches 960 m/Ma ( $\pm 40$  m/Ma) during the last 5.7 Ma ( $\pm 0.25$  Ma) in the deepest part of the basin.

The subsidence is organised in three compartments that seem related to the very deep structure of the margin during the opening of the Liguro-provençal basin. These very high total subsidence rates enable high sedimentation rates along the margin with sediments provided by the Rhône river flowing from the Alps, which in turn enable the detailed record of climate evolution during Pliocene-Quaternary that make of the Gulf of Lion a unique archive.

These results have been extended in 3D during Estelle Leroux PhD but also onland during Stéphane Molliex postdoc and towards the Valencia basin where similar measurements are under process within Romain Pellen PHD (see their respective presentations).

## 2.2.2 (o) Quantification de la dénudation dans les bassins versants des marges du Golfe du Lion et de Corse orientale

Stéphane Molliex<sup>1,2</sup>, Marina Rabineau<sup>1</sup>, Gwenael Jouet<sup>1</sup>, Didier Bourlès<sup>3</sup>, Estelle Leroux<sup>1,2</sup>, Julien Moreau<sup>1,3</sup>, Nicolas Freslon<sup>1,3</sup>, Daniel Aslanian<sup>1</sup>, Christine Authemayou<sup>2</sup>, Laetitia Leanni<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Marines, Plouzané

<sup>2</sup>LDO, Plouzané

<sup>3</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

Les marges françaises, de part les nombreuses études réalisées lors de ces dernières années, constituent de formidables laboratoires naturels pour étudier et quantifier les processus de dénudation, de transfert, et de

sédimentation dans une approche « source to sink ».

Le Golfe du Lion est le réceptacle d'un bassin versant de plus de 120 000 km<sup>2</sup> qui draine différentes unités structurales comme les Alpes, les Pyrénées et le Massif Central. La marge orientale de Corse est quant à elle alimentée par des bassins de taille beaucoup plus réduite (1000 km<sup>2</sup>) qui drainent 2 unités structurales, le domaine alpin (schistes lustrés et ophiolites) et le domaine hercynien (granite et roches volcaniques acides) constituant respectivement les parties aval et amont du bassin. Dans cette étude, plusieurs méthodes de quantification des taux de dénudation ont été utilisées : (i) la compilation des données de flux sédimentaires actuels directement mesurées dans les rivières, (ii) les mesures de concentration en nucléides cosmogéniques <sup>10</sup>Be à l'échelle des bassins versants, (iii) l'estimation des volumes érodés à partir de MNTs, (iv) l'estimation des volumes sédimentaires déposés au niveau des marges. L'étude de ces deux systèmes de taille très différente s'avère très complémentaire.

Les résultats montrent une bonne cohérence entre les différentes méthodes. Si le système du Golfe du Lion s'avère principalement contrôlé par l'impact des morphologies glaciaires à différentes échelles de temps quaternaires, c'est principalement la lithologie et la végétation qui semblent contrôler la dénudation actuelle en Corse. A l'échelle du Quaternaire, des variations entre les différentes périodes climatiques peuvent être mises en évidence en Corse, tandis que la plus faible résolution des données dans le golfe du Lion ne met en valeur qu'un doublement des taux de dénudation depuis 1 Ma par rapport au Pliocène.

## 2.2.3 (o) Quantification des flux sédimentaires détritiques et de la subsidence du bassin provençal depuis 23 Ma

Estelle Leroux<sup>1,2,3</sup>, Marina Rabineau<sup>1</sup>, Daniel Aslanian<sup>2</sup>, Christian Gorini<sup>3</sup>, François Bache<sup>4</sup>, Stéphane Molliex<sup>1</sup>, Cécile Robin<sup>5</sup>, Laurence Droz<sup>1</sup>, Didier Granjeon<sup>6</sup>, Maryline Moulin<sup>2</sup>, Jeffrey Poort<sup>3</sup>, Jean-Loup Rubino<sup>7</sup>, Jean-Pierre Suc<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LDO, Plouzané

<sup>2</sup>Geosciences Marines, Plouzané

<sup>3</sup>ISTeP, Paris

<sup>4</sup>GNS Science, Lower Hutt, Nouvelle-Zélande

<sup>5</sup>Geosciences Rennes

<sup>6</sup>IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison

<sup>7</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

Bien que le Golfe du Lion et le Bassin Provençal aient été l'objet de recherche intensive à toute échelle de temps et d'espace, les budgets sédimentaires et les mouvements verticaux depuis la formation de la marge demeureraient mal contraints ou sources de controverses. Ils sont ici quantifiés à partir de l'interprétation de nombreux profils sismiques, d'après les concepts de stratigraphie sismique et séquentielle [Vail et al., 1977], complétée par des données de forages et de sismique réfraction, et validée par des modélisations stratigraphiques avec Dionisos [Granjeon & Joseph, 1999]. La continuité stratigraphique entre le domaine de plate-forme et le bassin profond établie, la vision complète du remplissage sédimentaire de la marge permet de déceler une augmentation très forte (X2) des apports détritiques autour de 1 Ma en liaison avec les changements climatiques de la révolution Mi-Pléistocène et le changement de fréquence et d'amplitude des cycles eustatiques. L'accélération mondiale (par 3) des flux terrigènes il y a 5 Ma, défendue par de nombreux auteurs et corrélée aux grandes orogénèses (ici alpine), est également observée dans notre bassin. L'enregistrement sédimentaire fournit en outre de précieux indicateurs des mouvements verticaux de la marge depuis le rifting (Rabineau et al., 2014). Les trois domaines de subsidence différentielle mis en évidence se corréleront en effet aux grands domaines structuraux sous-jacents identifiés grâce aux données de sismique grand angle (Aslanian et al., 2012, Moulin et al., soumis) : (1) le

domaine à croûte continentale, (2) celui à croûte continentale amincie et (3) celui à croûte intermédiaire.

## 2.2.4 (o) Morphogenesis of submarine terraces offshore Safi (Morocco margin)

Massinissa Benabdellouahed<sup>1</sup>, Agnès Baltzer<sup>2</sup>, Youssef Biari<sup>1,3</sup>, Marina Rabineau<sup>4</sup>, Frauke Klingelhofer<sup>1</sup>, Daniel Aslanian<sup>1</sup>, Mohamed Sahabi<sup>1</sup>, Michael Schnabele<sup>5</sup>, Maryline Moulin<sup>1</sup>, Philippe Schnurle<sup>1</sup>, Mikael Evain<sup>1</sup>, Christian Reichert<sup>5</sup>

<sup>1</sup> IFREMER, Plouzané

<sup>2</sup> Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique, Nantes

<sup>3</sup> Université El Jadida, Maroc

<sup>4</sup> Institut Universitaire Européen de la Mer, Plouzané

<sup>5</sup> BGR Hanovre - Allemagne

During the Mirror cruise (2010), geophysical data were acquired along the northwestern margin of Africa, offshore Safi (Morocco), by IFREMER (French Institute for Sea) the German Bundesanstalt fuer Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) and 3 universities (University of Brest, University of Lisbon and the university of El Jadida). Reflection and wide-angle seismic profiles together with multi-beam echo sounder data and chirp sub-bottom profiles have been acquired in this portion of the margin.

The bathymetric map and chirp profiles reveal the existence of several discrete morphologies such as salt domes, faults, several channels and canyons. These canyons reflect the influence of sediment fluxes in this area. The seafloor is marked by numerous faults, from 300m to 2000m of water depths. All of these faults coincide with diapiric structures. Offshore Safi in the northern Aggadir canyon, four terraces have been mapped around 3000 m of water depth. These terraces show the migration of a canyon from south-west to north-east. This migration is associated with a tectonic uplift of the basement, which can be identified as a bulge on the seismic profiles. This bulge may correspond to the marine extension of the High Atlas mountains. We call this bulge the Atlantic Atlas and suggest that the timing of the terraces morphogenesis is contemporaneous with the recent uplift of the Atlas Atlantic.

## 2.2.5 (o) Surrection tardi-néogène et évolution du relief dans le sud-est des Bétiques (Espagne)

Nicolas Loget<sup>1</sup>, Marianne Janowski<sup>1</sup>, Cécile Gautheron<sup>2</sup>, Jean Van Den Driessche<sup>3</sup>, Julien Babault<sup>4</sup>, Xavier Diot<sup>5</sup>

<sup>1</sup> iSTeP, Paris

<sup>2</sup> IDES, Orsay

<sup>3</sup> Géosciences Rennes

<sup>4</sup> Universitat Autònoma de Barcelona, Espagne

<sup>5</sup> Institute of Geological Sciences, University of Bern, Suisse

La surrection des cordières bétiques et des bassins marins néogènes périphériques résulte de processus tectoniques récents (convergence Af-Eur, topographie dynamique) faisant suite à une phase de distension Miocène liée à la migration du slab vers l'ouest. A travers une étude géomorphologique et thermochronologique BT centrée sur la Sierra de Gador dans le domaine des Alpujarides, nous proposons ici de nous intéresser à la mise en place du relief récent dans cette région ainsi que ses conséquences sur l'évolution du réseau de drainage.

Les analyses thermochronologiques BT (U-Th)/He sur apatites indiquent un âge  $9 \pm 0.7$  Ma. Les modélisations effectués en combinant les données AFT, ZFT et Ar/Ar disponibles dans la littérature montrent un refroidissement rapide de 20 à 15 Ma puis un ralentissement jusqu'à la surface lié en grande partie à l'extension Miocène. La surface

est atteinte à 7.2 Ma marqué par la présence de dépôts calcarénitiques de plate-forme au voisinage direct des échantillons. Aucun reset post 7.2 Ma n'a été détecté indiquant une faible épaisseur déposée au-dessus de ces calcarénites tortoniennes. Aucune exhumation liée à la reprise en compression (datée autour de 7 Ma) n'a pu être détectée sur ce domaine des Alpujarides.

La surface fini-tortonienne présente au sommet de la Sierra de Gador constitue ainsi un quasi-marqueur du rock uplift enregistré par la zone depuis 7 Ma. Cette surface est aujourd'hui incisée et entaillée par de profondes vallées. La différence d'altitude entre la courbe enveloppe de cette surface tortonienne et le fond des vallées actuelles traduit à la fois le relief actuel mais aussi la quantité de matériel érodé dans la chaîne depuis sa surrection. Les bassins sédimentaires périphériques doivent donc avoir enregistré l'essentiel de l'érosion de la chaîne et tout bassin ne contrebalançant pas la quantité de sédiments érodés prédit par le bilan érosif témoignera d'un réarrangement du réseau de drainage. Le bassin du Poniente où se déverse les drains du flanc sud montre un bilan sédimentaire excédentaire plaçant pour une réorganisation du réseau de drainage au cours de la surrection de la chaîne. Finalement, nous montrons ici que la surrection de la Sierra de Gador constitue un remarquable exemple de soulèvement de surface post-tortonienne qui apparaît localisé puisque affectant l'organisation du réseau de drainage dans cette région.

## 2.2.6 (o) Cenozoic evolution of the Ivory Coast-Ghana transform margin : implication for a source-to-sink analysis of the Volta drainage system

Damien Huyghe<sup>1,2</sup>, Dominique Chardon<sup>1</sup>, Delphine Rouby<sup>1</sup>, Jing Ye<sup>1,2</sup>, Jean-Louis Grimaud<sup>1</sup>, Olivier Broucke<sup>2</sup>, François Guillocheau<sup>3</sup>, Cécile Robin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> GET, Toulouse

<sup>2</sup> TOTAL, Paris-La Défense

<sup>3</sup> Géosciences Rennes

The clastic sedimentary record of passive margins is a function of lithospheric deformation, eustasy and morphoclimatic evolution of source continental areas. The African passive/transform margin of the Equatorial Atlantic is a unique natural laboratory to explore the feedbacks between those processes during the Cenozoic. Indeed, onshore denudation and drainage history of the margin has been reconstructed by the spatial analysis of dated and regionally correlated geomorphic markers of former base levels. This onshore history can be compared to the offshore sedimentary record from the interpretation of seismic lines calibrated by biostratigraphy.

We thus initiated a source to sink approach on the Ivory Coast - Ghana segment of the margin between the Romanche and Chain fracture zones (from Ghana to Benin), which has been mainly fed by the Volta drainage system during the Cenozoic. Offshore data show that Cenozoic deposits often lie over the Cretaceous on a major erosion surface. Paleogene deposits are rarely preserved and affected by strong erosion, probably Oligocene in age. Neogene sedimentation is more continuous even though Mid-Miocene slump deposits demonstrate important regional slope destabilization processes. Plio-Pleistocene delta progradations are well documented along the margin segment.

The Oligocene erosion event correlates with a major regional drainage reorganization within the source domain ca. 30 Ma that resulted in the inland growth of the Volta catchment. Since 30 Ma, the drainage configuration is stationary and allows for the detailed correlation of the morphoclimatic record (based on the sequence of lateritic paleoland-surfaces) with offshore stratigraphic architecture. Our approach will be extended to whole equatorial margin and will compare erosion and se-

dimentation budgets as well as the nature of exported regoliths and deposited clastics.

## 2.2.7 (o) Mouvements verticaux de la marge Nord-Ouest Africaine

Guillaume Baby<sup>1</sup>, Alexis Caillaud<sup>2</sup>, Gerome Calves<sup>3</sup>, Francois Guillocheau<sup>1</sup>, Cécile Robin<sup>1</sup>, François Leparmentier<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

<sup>2</sup>CVA Engineering, Paris-La Défense

<sup>3</sup>GET, Toulouse

<sup>4</sup>TOTAL, Paris-La Défense

Les marges d'Atlantique central en Afrique de l'Ouest sont des marges plates au relief peu marqué. Pourtant des études récentes de thermochronologie montrent d'importantes phases de dénudation (Bertotti et al., Int J Earth Sci, 2012) en amont de certaines de ces marges.

Cette étude est basée sur une analyse stratigraphique des principaux bassins côtiers de la marge Nord-Ouest Africaine. L'objectif étant (1) de réaliser une analyse des géométries sédimentaires à l'échelle de la marge (depuis le Maroc jusqu'au Sénégal), de la zone amont du plateau continental jusqu'à la plaine abyssale; (2) de contraindre et de quantifier les mouvements verticaux qui affectent cette marge; (3) de discuter de l'impact de ces déformations sur la morphologie de la marge (accommodation, partitionnement sédimentaire entre le plateau continental et le bassin profond) et de leurs implications géodynamique.

Les structures héritées de l'extension Triasique contrôlent les géométries aggradantes des plateaux continentaux, depuis le Jurassique (aggradation carbonatée : plateforme Téthysienne) jusqu'au Crétacé inférieur (sédimentation mixte : silicoclastique/carbonatée). La morphologie actuelle de la marge s'acquière à la transition Cénomaniens-Turonien. La fin de la subsidence thermique de la marge réduit l'accommodation et entraîne la mise en place de prismes progradants qui caractérisent les marges Atlantique.

Deux phases de surrection majeure ont été identifiées. (1) Durant le Crétacé inférieur (Berriasien-Barrémien) le long de la marge Marocaine et de la marge Guinéenne. L'origine de cette première phase de déformation n'est pas connue. (2) Durant le Crétacé supérieur (Santonien-Campanien), depuis la marge Mauritanienne jusqu'à la marge Guinéenne. Cette phase de déformation est à rattacher aux déformations Sénoniennes.

Il n'y a pas de surrection majeure de la marge au Cénozoïque qui caractérise les marges Sud Atlantique. Les prismes silicoclastiques (e.g. Oligocène-Miocène) préservés le long de la marge témoignent de surrections très distales dans la zone amont (e.g. surrection de l'Hoggar).

## 2.2.8 (o) Etude couplée géomorphologie - géométrie sédimentaire de marge sud-namibienne : contraintes pour la cinétique de la surrection du Plateau sud-africain

François Guillocheau<sup>1</sup>, Olivier Dauteuil<sup>1</sup>, Guillaume Baby<sup>1</sup>, Martin Pickford<sup>2</sup>, Brigitte Senut<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

<sup>2</sup>MNHN, Paris

The timing of the uplift of the Southern African (or Kalahari) Plateau is debated, with four scenarios of uplift : (1) at time of rifting (Early Cretaceous), (2) during Late Cretaceous, (3) around the Eocene-Oligocene boundary and (4) during Pliocene times. This knowledge is of primary importance for a better understanding of the mantle processes at the origin of this very long wavelength structure.

To answer this question, we studied the key area of the northern Orange Margin (sequence stratigraphic analysis of seismic lines and wells), offshore of the Sperrgebiet. This study is coupled with an analysis of the landforms dated with associated sediments and volcanics.

(1) The first uplift of the Plateau was during Late Cretaceous times, with a first increase of siliciclastic sediments supply during Late Cenomanian (95-90 Ma) in response to the beginning of the uplift along the Indian Ocean side that propagates eastward around the Campanian (85-70 Ma).

(2) Because of the humid climatic conditions prevailing since Santonian (85 Ma), most of the relief of this first plateau is removed by erosion. At the end of the planation of this topography, chemical erosion is dominant with the growth of thick lateritic profiles (55 ?-45 Ma).

(3) A second uplift of the Plateau occurred during Late Eocene-Early Oligocene (30-40 Ma - paroxysm) and Miocene with the incision of at least three generations of pediments that shape the present-day « Great » Escarpment.

(4) This « old » Oligocene relief is probably preserved because of the decrease of the erosion due to the climate aridification, starting at Middle Miocene times (around 15 Ma).

## 2.2.9 (o) Reconstitution du réseau de drainage méso-cénozoïques du bassin d'avant-pays amazonien

Martin Roddaz<sup>1</sup>, Mélanie Louterbach<sup>1,2</sup>, Gêrome Calves<sup>1</sup>, Francisco Parra<sup>1</sup>, Caroline Sanchez<sup>1</sup>, Patrice Baby<sup>1,3</sup>, Jérôme Viers<sup>1</sup>, Elton Dantas<sup>4</sup>, Ysabel Calderon<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Repsol Exploration/ Regional Studies, Madrid, Espagne

<sup>3</sup>PERUPETRO S.A, Lima, Pérou

<sup>4</sup>Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brésil

Les études récentes que nous avons menées sur les matières en suspension (MES) transportées par les deux plus gros tributaires de l'Amazone (le Solimoes et le Madeira) et sur les sédiments piégés dans les plaines d'inondations (Varzea Curuai) ont montré le potentiel des terres rares et des isotopes du Néodyme (Nd) pour caractériser les MES transportées par les différents fleuves amazoniens (Viers et al., 2008, Roddaz et al. en révision). Les terres rares et donc les isotopes du Nd n'étant pas sensibles à l'altération, la diagenèse et au métamorphisme (e.g. McLennan et al., 1993) sont donc un outil puissant pour reconstituer les palé-réseaux de drainage amazoniens. D'un point de vue géologique, on peut distinguer deux phases dans l'évolution géodynamique du bassin amazonien : i) une phase pré-miocène où le bassin amazonien s'étendait de la Bolivie à la Colombie caractérisé par un réseau de drainage orienté du sud vers le nord (Roddaz et al., 2010) et ii) une deuxième phase qui débute entre 11.8 et 11.3 Ma avec l'arrivée des premiers sédiments andins dans le cône de l'Amazone (Figueiredo et al., 2009) où le réseau fluvial amazonien est transcontinental (Ouest-Est). A travers deux exemples, nous montrons comment les outils géochimiques peuvent être utilisés pour contraindre l'âge d'existence des premiers réseaux fluviaux andins (Louterbach et al., en préparation) et mettre en évidence le contrôle tectonique de l'arche d'Iquitos sur le réseaux de drainage au Pliocène (Roddaz et al., 2005a,b). Finalement, grâce aux données de sous-sol auxquelles nous avons accès par l'intermédiaire de la convention IRD-PeruPetro, nous montrons le potentiel de la sismique réflexion 3D pour quantifier les paramètres (largeur de chenal, sinuosité) du paléo-réseau de drainage amazonien (Calvès et al., soumis; cf session 2.1).

Références

Calvès, G., et al, soumis, Interpretation ;

Figueiredo, J et al., 2009. Geology, 37(7) : 619-622 ;

Roddaz, M., et al., 2005a. Tectonophysics, 399(1-4) : 87-108 ;

Roddaz, M., et al., 2005b. Earth Planet. Sc. Lett., 239(1-2) : 57-78 ;

Roddaz, M., et al., 2010. in Amazonia : Landscape and Species Evolution. Wiley-Blackwell Publishing Ltd., pp. 61-88 ;  
 Roddaz, M., et al., en révision. Chemical Geology ;  
 Viers, J., et al., 2008. Earth and Planetary Science Letters, 274 : 511-523

### 2.2.10 (o) Post-Deccan evolution of Western Ghats (Peninsular India) : 40Ar-39Ar dating of supergene K-Mn oxides

Nicolas Bonnet<sup>1</sup>, Anicet Beauvais<sup>1</sup>, Nicolas Arnaud<sup>2</sup>, Dominique Chardon<sup>3</sup>, Jayananda Mudlappa<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier

<sup>3</sup>GET, Toulouse

<sup>4</sup>University of Delhi, Department of Geology, Inde

The western passive margin of Peninsular India is marked by the Western Ghats Escarpment (WGE), which separates the coastal lowland from the East dipping Mysore plateau and is carved into the 63-Ma old Deccan Trapps. Previous studies predicted that the WGE resulted from differential erosion across an elevated rift shoulder, and thermochronologic models predicted higher denudation in the coastal lowland than on the plateau by ~ 50 Ma.

We provide complementary time constraints on the evolution of the passive margin by 40Ar-39Ar dating of supergene K-Mn oxides (cryptomelane) sampled in lateritic formations exposed on paleosurfaces, which are preserved as relicts on the plateau and coastal lowland. Two main lateritic paleosurfaces were identified on the plateau at altitude ranges of 1100-850 m (S2), and 800-600 m (S3), and a lower paleosurface in the coastal area at 150-50 m (S4).

Cryptomelane was sampled in Mn lateritic profiles exposed on each paleosurface. On S2 and S3, the ages range from ~ 36 to ~ 26 Ma in Sandur and from ~ 39 to ~ 20 Ma in Shimoga Mn ore deposits. S4 ages are grouped at 45-47 Ma and 20-26 Ma, with a younger age at 8.7 Ma.

The 45-47 Ma ages clearly document the preservation of old lateritic alterations at the foot of the WGE, attesting to the antiquity of the escarpment, which had already been shaped 47 Ma ago. Ages obtained on the coastal lowland are also indicative of limited erosion at the foot of the WGE since 47 Ma. The 40Ar-39Ar ages from inland high elevation landsurfaces S2 and S3 document two major periods of lateritic weathering on the Mysore plateau during Mid- to Late Eocene and Early Oligocene to Mid Miocene. Most of the dissection of plateau landsurfaces S2 and S3 must therefore have taken place in Post-Mid Miocene times. Our results indicate long-lived maintenance of elevation difference and divergent erosional histories across the WGE since it was formed at least 47 Ma ago.

### 2.2.11 (o) Variations annuelles des signatures isotopiques en Nd et Sr des MES du Maroni, de l'Orenoque et de l'Amazone

Tristan Rousseau<sup>1</sup>, Martin Roddaz<sup>1</sup>, Gerome Calves<sup>1</sup>, Germain Bayon<sup>2</sup>, Samuel Toucanne<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>IFREMER, Plouzané

La compréhension du mode de dépôt sédimentaire sur des marges continentales représente un intérêt majeur pour les études paléoclimatiques, et l'exploitation de ressources fossiles. L'interprétation d'enregistrements passés demande toutefois une bonne connaissance des systèmes actuels. La marge nord de l'Amérique du sud est le siège d'apports de

2 grands émissaires : L'Amazone et l'Orénoque. Pour l'Amazone, les transferts proximal-distal de sédiments grossiers sont intensifiés lors des périodes glaciaires et réduits à l'interglaciaire, le transport des particules fines a cependant été peu étudié. Les sédiments échantillonnés au large de ces fleuves drainent des provinces à signatures géochimiques contrastées et relativement bien caractérisées. L'analyse de traceurs géochimiques comme le rapport Al/Si renseigne le degré d'altération des sédiments et la composition isotopique du Nd et du Sr permet de contraindre leur provenance. Néanmoins plusieurs questions subsistent dans la calibration des signatures des apports actuels, par exemple, y a-t-il un contrôle du cycle hydrologique et du tri vertical des Matières en Suspension (MES) fluviales sur les signatures isotopiques à l'exutoire de ces grands fleuves. Nous présenterons des séries temporelles annuelles de ces traceurs analysés pour les MES des fleuves Maroni, Orénoque et Amazone et un transect de profils verticaux de l'Amazone échantillonnés dans le cadre du projet Hybam.

### 2.2.12 (p) Quantifying denudation of West Africa over the last 45 Ma : implications for cratonic erosion budgets and the Niger source-to-sink system

Jean-Louis Grimaud<sup>1,2</sup>, Dominique Chardon<sup>1</sup>, Delphine Rouby<sup>1</sup>, Anicet Beauvais<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>St Anthony Fall Lab, Minneapolis, États-Unis

<sup>3</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

We develop an approach based on the differential elevation of dated successive topographies of Subsaharan West Africa to calibrate in-situ volumetric denudation over a 3.9 million km<sup>2</sup> cratonic surface for the past 45 Ma. We obtain a regionally averaged volumetric erosion rate of 5 x 10<sup>-3</sup> km<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/m.y. corresponding to a denudation of 300 m and a denudation rate of 6 m/m.y., which remained nearly constant for three time spans (45- 24, 24-11 and 11-0 Ma) despite spatial variations related to epeirogenic movements and global climatic cooling. Denudation is converted into a minimum yield of 15 +/- 3 t/km<sup>2</sup>/yr with a minimum solute component of 5 +/- 3 t/km<sup>2</sup>/yr accounting for the porosity of the regolith being eroded. Our results would imply a minimum contribution of 2 +/- 0.6 Gt/yr of the non-orogenic landmass to the global continental yield since the last peak greenhouse.

Volumetric denudation analysis applied by sub-drainage area attests to the role of drainage reorganization documented between 30 and 24 Ma ago and lithospheric deformation (flexure of the abrupt segment of the margin and amplification of the Hoggar intraplate swell) on the spatial and temporal distribution of continental denudation and yield. On-shore denudation and clastic sediments accumulation in the post-24 Ma Niger catchment - delta system are of the same order of magnitude, providing a validation of the volumetric denudation estimate method. However, accumulated volumes exceed denudation for the most recent considered time interval (11-0 Ma), pointing to the biases in interpreting continental erosion histories from the sole sedimentary archives, even in « stable » tectonic contexts. Nevertheless, our estimates of long-term erosion fluxes may be used to estimate the size of large cratonic catchments from the fossil sedimentary record.

### 2.2.13 (p) Enregistrement stratigraphique de l'évolution du plateau Sud Africain (marge Nord Namib)

Guillaume Baby<sup>1</sup>, Jonas Ressouche<sup>1</sup>, François Guillocheau<sup>1</sup>, Olivier Broucke<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>*Géosciences Rennes*  
<sup>2</sup>*Total, Paris-La Défense*

L'évolution du plateau Sud-Africain (ou Kalahari), figure majeure du relief Sud-Africain, est très débattue. Il résulte d'au moins deux phases de surrection, une phase au Crétacé supérieur (Cénomanién terminal à Campanien) et une phase au Cénozoïque. L'âge de la surrection Cénozoïque et la cinétique d'érosion associée sont mal connues.

L'objectif de cette étude est de discuter de l'évolution du plateau Sud-Africain à partir d'une analyse stratigraphique de lignes sismique offshore de la partie nord de la marge Namibe (bassins de Walvis et de Luderitz).

L'évolution Cénozoïque de la marge peut être synthétisée comme suit :

- Le prisme progradant, aggradant du Crétacé supérieur, résultant de la première phase de surrection du plateau, induit un vaste replat qui contrôle la distribution spatiale des dépôts Cénozoïques.
- Première phase de surrection du plateau au Paléocène, associée à la mise en place de deux prismes sableux dans le bassin de Walvis.
- Inondation majeure de la marge à l'Yprésien.
- Deuxième phase de surrection du plateau à l'Eocène supérieur (transition Bartonien-Priabonien), associée à un basculement de la marge et à la mise en place d'un prisme de régression forcée.
- Troisième phase de surrection mal contrainte au Miocène supérieur, associée à la mise en place d'un prisme de régression forcée. Apparition de courants de contour (dépôts de contourites).

## 2.2.14 (p) Evolution tectono-sédimentaire des marges conjuguées du Golfe du Lion et du sud-ouest Sarde et modélisations stratigraphiques

Estelle Leroux<sup>1,2,3</sup>, Marina Rabineau<sup>1</sup>, Daniel Aslanian<sup>2</sup>, Christian Gorini<sup>3</sup>, Speranta-Maria Popescu<sup>4</sup>, Nadia Barhoun<sup>5</sup>, Mihaela-Carmen Melinte-Dobrinescu<sup>6</sup>, Jeffrey Poort<sup>3</sup>, Christian Blanpied<sup>7</sup>, Jean-Loup Rubino<sup>8</sup>, Jonathan Floodpage<sup>7</sup>, Cécile Pabian<sup>7</sup>, Jean-Luc Auxietre<sup>7</sup>, Jean-Pierre Suc<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*LDO, Plouzané*

<sup>2</sup>*Geosciences Marines, LGG, Plouzané*

<sup>3</sup>*iSTeP, Paris*

<sup>4</sup>*GeoBioStratData. Consulting, Rillieux la Pape*

<sup>5</sup>*University Hassan II-Mohammedia, Faculty of Sciences Ben M'Sik, Casablanca, Maroc*

<sup>6</sup>*GEOECOMAR, Bucharest, Roumanie*

<sup>7</sup>*TOTAL, Paris-La Défense*

<sup>8</sup>*TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau*

La stratigraphie plio-pléistocène sur la marge du Golfe du Lion est connue (Leroux, 2012; Leroux et al., 2014). Les surfaces remarquables (3,8 Ma, 2,6 Ma, 1,6 Ma, 1 Ma), sont prolongées jusque dans le bassin profond, et corrélées avec l'enregistrement sédimentaire observé sur la marge homologue ouest-sarde. Les marqueurs stratigraphiques du Miocène, syn et post-rift font également l'objet d'une étude détaillée sur l'ensemble du bassin Liguro-Provençal grâce aux récentes données de la campagne de sismique Haute-Résolution AM-MED, des données académiques PROGRES, SARDINIA ainsi que de nombreuses données sismiques pétrolières. Les données de forages pétroliers du Golfe du Lion et de Sardaigne ainsi que celles du Site DSDP 372-Leg42 et DSDP134-Leg13 ont été révisées à la lumière des nouvelles chartes et analyses biostratigraphiques complémentaires permettant ainsi de nouvelles reconstitutions paléo-environnementales. Cela nous permet de préciser l'âge et la nature des surfaces pointées sur la sismique réflexion et de caractériser les environnements de dépôts. Les études déjà menées à terre (Bassin du Sud Est) ou en cours (Ouest Sarde) viendront appuyer notre modèle géologique d'évolution tectono-sédimentaire du système.

La compréhension des modes de dépôts et la lecture des séquences sédimentaires des deux marges conjuguées donneront ainsi des renseignements clés sur les paleo-variations et amplitudes de flux et d'accommodation, ainsi que sur les modalités de la subsidence, et donc sur l'évolution thermique et la formation des hydrocarbures.

A terme, l'évolution tectono-sédimentaire sera intégrée dans des simulations stratigraphiques 2D et 3D (logiciel DIONISOS développé à l'IFP-EN). Bien au-delà du simple intérêt régional, ce sont des hypothèses et des modèles reliés d'une part à la formation des marges et à leur évolution, d'autre part au comportement des systèmes sédimentaires en relation avec les changements climatiques qu'il s'agit de tester.

Ref :

Leroux, E., 2012. Quantification des flux sédimentaires et de la subsidence post-rift du bassin Provençal. Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 457pp.

Leroux, E., Rabineau, M., Aslanian, D., Granjeon, D., Gorini, C., Droz, L., 2014. Stratigraphic simulation on the shelf of the gulf of lion : testing subsidence rates and sea-level curves during pliocene and quaternary. Terra Nova, doi : 10.1111/ter.12091

## 2.2.15 (p) Quantification of the Pliocene-Quaternary subsidence from sedimentary paleo-markers : involvement of tectono-magmatic events in the Valencia Basin (SW Mediterranean)

Romain Pellen<sup>1,2</sup>, Marina Rabineau<sup>1</sup>, Daniel Aslanian<sup>2</sup>, Estelle Leroux<sup>1,2,3</sup>, Christian Gorini<sup>3</sup>, Maryline Moulin<sup>2</sup>, Nathalie Ethève<sup>4</sup>, Dominique Frizon De Lamotte<sup>4</sup>, Laurence Droz<sup>1</sup>, Jean-Loup Rubino<sup>5</sup>, Cécile Pabian-Goyheneche<sup>5</sup>, Christian Blanpied<sup>6</sup>, Jean-Luc Auxietre<sup>6</sup>, Francois Ribot<sup>6</sup>, Jonathan Floodpage<sup>6</sup>, Jeffrey Poort<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*LDO, Plouzané*

<sup>2</sup>*Laboratoire de Géodynamique et de Géophysique, Plouzané*

<sup>3</sup>*iSTeP, Paris*

<sup>4</sup>*GEC, Cergy Pontoise*

<sup>5</sup>*TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau*

<sup>6</sup>*TOTAL, Paris-La Défense*

Sedimentary markers provide clues to estimate vertical movements affecting the sedimentary record during a basin formation and deformation.

We present the result of a quantitative modelling of subsidence of the Ebro margin and SW Valencia Trough and associated uplift in the coastal range. This study is based on seismic stratigraphy and drill data interpretations (Rabineau et al., 2014). Pliocene and Quaternary subsidence rates are presented along two regional profiles imaged by multichannel seismic data. Similarly, isostatic rebound related to the Messinian event is evaluated on the Ebro margin domain.

A large amount of high-quality seismic database is currently available from industrial and academic project, including drilling data. The Valencia trough, therefore, provides an excellent example for studying basin formation and deformation in a convergent regime. We established stratigraphic framework of magmatic and tectonic events from the Middle Miocene to the Quaternary. We focused on the relation between Pre-existing structures and localisation of the deformation in the area.

Pliocene-Quaternary subsidence seem to have been controlled by phases of Messinian - Lower Pliocene uplift and / or Pliocene and quaternary magmatic events. The origin of tectono-magmatic events - and their interaction with the sedimentary record - will be discussed in order to integrate observations and measurements into a coherent view of the West-Mediterranean area.

## 2.2.16 (p) Evolution néogène supérieur de la marge marocaine du bassin d'Alboran : Etude intégrée Terre-Mer du bassin de Boudinar

Manfred Lafosse<sup>1</sup>, Mohamed Achalhi<sup>2</sup>, Elia d'Acremont<sup>1</sup>, Philippe Munch<sup>3</sup>, Belen Alonso<sup>4</sup>, Abdellah Ammar<sup>5</sup>, Ali Azdimousa<sup>6,7</sup>, Abdelkhalak Ben Moussa<sup>8</sup>, Jean-Jacques Cornée<sup>3</sup>, Michel Corsini<sup>9</sup>, Gemma Ercilla<sup>4</sup>, Carmen Juan<sup>4</sup>, Christian Gorini<sup>1</sup>, Gilles Merzeraud<sup>3</sup>, Mihaela Melinte-Dobrinescu<sup>10</sup>, Frédéric Quillevère<sup>11</sup>, Alain Rabaute<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*iSTeP, Paris*

<sup>2</sup>*Université Mohamed I, Oujda, Maroc*

<sup>3</sup>*Géosciences Montpellier*

<sup>4</sup>*ICM-CSIC, Barcelone, Espagne*

<sup>5</sup>*Département de Géologie, Université Mohammed V, Rabat, Maroc*

<sup>6</sup>*Faculté des sciences, Oujda, Maroc*

<sup>7</sup>*Laboratoire Geosciences Appliquées, Faculté des Sciences,*

*Département de Géologie, Oujda, Maroc*

<sup>8</sup>*Département de Géologie, Université Abdelmalek Esaadi, Tetuán, Maroc*

<sup>9</sup>*GEOAZUR, Sophia Antipolis*

<sup>10</sup>*GeoEcoMar, Marine Geology and Sedimentology*

*Bucarest, Roumanie*

<sup>11</sup>*Laboratoire de Géologie de Lyon - Terre, Planètes, Environnement*

Le bassin de Boudinar est un des principaux bassins néogènes de la marge marocaine qui a enregistré l'évolution post-rift des marges du bassin d'Alboran. La sédimentation dans ce bassin a démarré au Miocène supérieur et s'est poursuivie jusqu'à l'actuel. L'objectif de ce travail est de décrire la dynamique sédimentaire de cette portion de la marge par une étude intégrée Terre-Mer à l'aide de l'interprétation de lignes sismique industrielle et académique et de nouvelles études de terrain. L'étude des séries à terre a mis en évidence que la sédimentation démarre au Tortonien inférieur-Serravalien ? et s'est poursuivie sans hiatus majeur jusqu'au Messinien supérieur. La surface d'érosion messinienne a pu être cartée sur l'ensemble du bassin et révèle une morphologie relativement plane avec des incisions locales de faible profondeur. Elle est surmontée localement par des dépôts de marnes (d'âge Pliocène basal) à blocs de récifs messiniens. La sédimentation marine pliocène est dominée par des dépôts silto-sableux d'âge Pliocène inférieur et organisés en séquence faiblement progradante. Enfin cet ensemble est tronqué par une surface d'érosion majeure au dessus de laquelle une sédimentation principalement continentale se met en place. En mer le socle acoustique est recouvert par environ 1500m de sédiments interprétés Miocène à Plio-Quaternaire. Deux surfaces d'érosions majeures limitent la base et le sommet d'une unité qui présente localement des facies sismiques chaotiques. La base de cette unité sismique correspond à la surface d'érosion messinienne enregistrée sur l'ensemble du Bassin d'Alboran. La géométrie des dépôts Pliocène est une séquence montrant des cliniformes faiblement pentés en biseau de progradation/agradation sur la surface d'érosion sous-jacente. Au sommet, des unités Plio-Quaternaires progradantes sont clairement organisées en cliniformes plus fortement pentés. La limite entre ces deux séquences est marquée par une surface d'érosion Pliocène.

## 2.3 Systèmes Sédimentaires Réservoirs (ASF)

### (Sedimentary Reservoir Systems) (ASF)

#### Responsables :

- Guilhem Hoareau (LFC-R, Pau)  
guilhem.hoareau@univ-pau.fr
- Adrian Cerepi (Géoressources et Environnement, ENSEGID, Bordeaux)  
adrian.cerepi@ipb.fr

**Résumé :** Les systèmes réservoirs constituent aujourd'hui une cible clé dans différents domaines des géoressources (hydrocarbures, géothermie, nappe profonde) et du stockage (CO<sub>2</sub>, déchets radioactifs). Afin de mieux connaître les facteurs gouvernant les importantes hétérogénéités et les anisotropies associées à ces systèmes réservoirs, il est essentiel de caractériser ces objets à différentes échelles (géométrie des corps sédimentaires, diagenèse et propriétés physiques, ...) et de déterminer la répartition de leurs propriétés en trois dimensions.

Cette caractérisation se fait généralement par intégration 3G de données obtenues par différents outils d'analyse du sous-sol, souvent à la pointe des développements technologiques : imagerie sismique, diagraphies de puits, analyses pétrophysiques, propriétés acoustiques, modélisation statique et dynamique des réservoirs etc. Une partie de cette session sera donc consacrée à la présentation de ces avancées technologiques permettant une caractérisation précise des systèmes réservoirs, nécessaire au développement de modèles statiques et dynamiques des réservoirs.

Cette session développera également les travaux de recherche en relation avec le genèse des systèmes réservoirs en contexte de plate-forme et de bassin : la signature géochimique et isotopique des systèmes réservoirs, l'enregistrement des hiatus sédimentaires par des critères diagénétiques, la modélisation des processus d'interaction eau/roche en milieu naturel, les processus géochimiques de l'altération, le rôle des microorganismes dans la diagenèse, les processus diagénétiques et géochimiques gouvernant les caractéristiques des réservoirs, etc. Cette session vise également à présenter les nouveaux outils et les avancées réalisées face au challenge de la caractérisation des réservoirs sédimentaires du sous-sol, en abordant les thèmes suivants :

- Géochimie et outils géochimiques appliqués aux systèmes réservoirs
- Sédimentogenèse des systèmes réservoirs
- Systèmes silicoclastiques et carbonatés
- Diagenèse des systèmes réservoirs
- Systèmes réservoirs de plate-forme et de transition plate-forme / bassin
- Interprétation et modélisation sismique
- Interprétation des diagraphies
- Mesures physiques des propriétés des roches
- Sismique de puits
- Apport des analogues terrains
- Modélisation réservoir
- ...

### 2.3.1 (o) Impact des évaporites sur la diagenèse des séries fluviatiles des mini bassins salifères de Sivas (Turquie)

Alexandre Pichat<sup>1,2</sup>, Guilhem Hoareau<sup>2</sup>, Jean-Marie Rouchy<sup>3</sup>,  
 Charlotte Ribes<sup>1,2</sup>, Charlie Kergaravat<sup>1,2</sup>, Cédric Bonnel<sup>2</sup>, Jean-Paul  
 Callot<sup>2</sup>, Jean-Claude Ringenbach<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>2</sup>LFC-R, Pau

<sup>3</sup>MNHN, Paris

La partie centrale du Bassin Oligo-Miocène de Sivas (Turquie) est affecté par une tectonique salifère intense, initiée à partir d'une épaisse accumulation d'évaporites (formation Hafik, Oligocène moyen). Cette tectonique salifère a contribué au développement de mini-bassins continentaux à marins aujourd'hui basculés et isolés par des murs de sel et/ou sutures. La remobilisation en climat aride des évaporites diapiriques bordant les mini bassins a alimenté de nombreux dépôts évaporitiques de seconde génération. Les dépôts fluviatiles des mini bassins sont ainsi souvent associés à des évaporites sebkhaïques pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres d'épaisseur.

Une étude diagénétique des faciès continentaux des mini bassins a été entreprise pour quantifier l'influence du contexte salifère sur leurs qualités réservoir. Les observations pétrographiques montrent que les grès fluviatiles sont extrêmement polygéniques. 90% de la porosité est comblée par 3 ciments : calcite (~88%), analcime (~10%), quartz (~2%). Les relations pétrographiques déterminées au microscope (optique, cathodoluminescence, MEB) permettent de proposer une paragenèse diagénétique des grès. Les premiers ciments à précipiter sont les analcimes et les surcroissances de quartz, suite à l'altération des grains volcaniques par des fluides interstitiels très alcalins dont l'origine reste à déterminer (pompage évaporitique en zone vadose, altération météorique des diapirs adjacents ou fluides salins profonds dérivés des murs de sels délimitant le mini-bassin). La calcite de remplacement se forme à plus forte profondeur, peut-être également à partir de fluides alcalins. Par ailleurs, au niveau des sutures salifères (bordure de mini bassins), la diagenèse s'exprime par une forte gypsification et calcification sur environ 1,5 m, s'intensifiant à mesure que l'on se rapproche du weld.

Des mesures géochimiques et isotopiques sont en cours pour contraindre l'origine des différentes générations de ciments.

### 2.3.2 (o) Relation plateforme / bassin au sud de l'Albanie : évolution tectono-stratigraphique de la plateforme apulienne et du bassin ionien durant le crétacé supérieur

Johan Le Goff<sup>1</sup>, Adrian Cerepi<sup>1</sup>, Corinne Loisy<sup>1</sup>, Michèle Caron<sup>2</sup>,  
 Rudy Swennen<sup>3</sup>, Kristaq Muska<sup>4</sup>, Hamdy El Desouky<sup>5</sup>, Grigor Heba<sup>6</sup>,

<sup>1</sup>GEORESSOURCES ET ENVIRONNEMENT, Pessac

<sup>2</sup>Université de Fribourg, Suisse

<sup>3</sup>KU Leuven, Leuven, Belgique

<sup>4</sup>University of Tirana, Albanie

<sup>5</sup>Menoufia University, Égypte

<sup>6</sup>DIAGNOS, Quebec, Canada

Intégrés dans la chaîne des albanides, les formations carbonatées du Crétacé Supérieur des zones Apulienne et Ionienne révèlent un exemple unique de relation plateforme-bassin. Une étude sédimentologique détaillée appuyée par des données bio- et chronostratigraphiques a été réalisée au sud de l'Albanie. Cette étude vise à établir un modèle d'évolution tectono-sédimentaire du système Plateforme Apulienne / Bassin

Ionien au Crétacé Supérieur. L'enregistrement sédimentaire de la plateforme Apulienne a été étudié pour la première fois sur sa bordure Est. L'identification de dix lithofaciès précise les conditions de sédimentation au Crétacé Supérieur. Micro-brèches et mudstone à fenestres caractérisent l'environnement le plus interne, supratidal. Les bafflestones à rudistes caractérisent l'environnement le plus externe, subtidal. Ces lithofaciès sont intégrés dans des para-séquences identifiées sur le terrain qui suggèrent un contrôle allocyclique de la sédimentation. La partie sommitale de l'intervalle étudié révèle des déformations syn-sédimentaires majeures. Une grande diversité de faciès et de processus de dépôt caractérisent la succession de bassin. Cinq associations de faciès caractérisent les dépôts re-sédimentés et précisent l'architecture de la marge carbonatée. Le système carbonaté atteste trois étapes d'évolution sédimentaire durant le Crétacé Supérieur. Depuis la base du Cénomaniens jusqu'au Turonien, un environnement de dépôt péritidal caractérise la plateforme carbonatée. Des dépôts hémipélagiques et turbiditiques faible densité se mettent en place dans le bassin, attestant à un faible taux de sédimentation. Durant le Turonien Supérieur et le Campanien, le système évolue rapidement vers des conditions de dépôt subtidales, attestées par un large développement des rudistes sur la plateforme. Dans le bassin, les séquences gravitaires révèlent une nette stratocroissance des dépôts. Le Maastrichtien est caractérisé par des destablisations majeures à l'échelle régionale. Ces dernières révèlent des déformations syn-sédimentaires de type slump liés à la tectonique de marge.

### 2.3.3 (o) Mineralogical distributions and chemical characterization of the eocene clastic series of the south central pyrenees (Isabena section, tremp basin, south pyrenean foreland basin)

Emmanuelle Chanvry<sup>1,2,3</sup>, Philippe Joseph<sup>1</sup>, Rémy Deschamps<sup>1</sup>,  
 Daniel Garcia<sup>2</sup>, Stéphane Teinturier<sup>3</sup>, Jean-Loup Rubino<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison

<sup>2</sup>Centre Sciences des Processus Industriels et Naturels, École Nationale Supérieure des Mines, Saint-Étienne

<sup>3</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

In siliciclastic systems the quality of petroleum reservoirs is controlled both by sedimentary processes and by diagenetic events. Primary mineralogy that impact diagenesis is controlled by sediment sources, climate variations, paleoenvironments and sedimentary transport. The latter induces mineral partitioning along the depositional profile.

We present the first results on a section including the Lower Eocene series of the Graus-Tremp basin, located in the South Pyrenean foreland basin. This basin is characterized by a high climate variability during Paleogene, a differentiated tectonic evolution inducing a change of sediment sources and trapping, and a sedimentary record from continental to deep-marine environments.

We tested a combination of different analytical techniques in a well constrained palaeogeographic and sequential framework calibrated on facies analysis and stratigraphic correlations. Systematic bulk rock geochemical analyses of major and trace elements were used to screen the inter-sample variability. By this way, the samples corresponding to pole of chemical compositions were selected for detailed studies (petrographic determinations with optical microscopy, SEM, cathodoluminescence, XRD analysis, mineralogical and elementary cartography) to constrain mineralogical variability.

Preliminary results from the section suggest that compositional variability may be controlled by particle size, and interpreted by the principle of hydrodynamic equivalence. Moreover, the sandstone intervals at the base of the sedimentary succession show siliciclastic lithoclasts,

which abundance decreases upwards in favor of carbonate lithoclasts. This imply a change of source area, from basement-dominated sources to thrust Mesozoic carbonate platform sources, which were uplifted during the thrust activity climax (Late Cuisian time). These mineralogical controlling factors vary in time and space and are geochemically/petrographically recorded. Future works imply to follow these variations on one stratigraphic interval in the Graus-Tremp, Ainsa and Jaca sub-basins along the whole depositional profile in order to characterize paleoenvironment controls.

### 2.3.4 (o) Modélisation par sismique synthétique 2D d'un système deltaïque progradant synsédimentaire : exemple du complexe fluvio-deltaïque du delta du Sobrarbe (Eocène, bassin d'avant-pays sud-pyrénéen, Espagne)

Nicolas Grasseau<sup>1,2</sup>, Aurelien Bordenave<sup>1</sup>, Carine Grélaud<sup>1</sup>, Philippe Razin<sup>1</sup>, Miguel López-Blanco<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ENSEGID, Pessac

<sup>2</sup>Departament d'Estratigrafia, Paleontologia i Geociències Marines, Universitat de Barcelona, Espagne

L'extraction des fluides passe par la compréhension structurale, géométrique et sédimentologique de l'architecture du réservoir. L'interprétation sismique est l'un des points clefs rendant possible cette tâche. Les géophysiciens ont besoin de pouvoir interpréter facilement des objets sismiques afin de leur donner un sens géologique. Le passage de l'affleurement à un modèle sismique par l'intermédiaire de la sismique synthétique 2D ou 3D fournit des outils et des exemples précis de reconnaissance. Par la grande qualité d'exposition de ses affleurements, le complexe fluvio-deltaïque du delta du Sobrarbe est un très bon candidat à la modélisation sismique synthétique 2D d'un système silicoclastique progradant. Une étude de terrain détaillée du flanc ouest du synclinal de « Buil », a permis la réalisation d'un transect de corrélations de très haute résolution d'orientation proximale/distale, c'est-à-dire des dépôts continentaux aux dépôts profonds du bassin. Le passage de l'affleurement au modèle sismique est réalisé par l'intermédiaire du logiciel de simulation GXII à partir de données diagrapiques « sonic » inventées, puis réelles issues des puits d'un champ pétrolier existant. Une première comparaison du résultat de la simulation avec le transect de corrélations permet d'observer les différences de géométries et d'amplitudes des réflexions en fonction de : (1) l'espacement des géophones, (2) l'augmentation de la fréquence, (3) des caractéristiques géologiques du transect. Une seconde comparaison avec des lignes sismiques réelles issues de « National Petroleum Reserve-Alaska » (N.P.R.A.), système fluvio-deltaïque progradant déposé dans un contexte géologique analogue, a été réalisée. Les ressemblances frappantes des réflexions, des géométries et des faciès sismiques entre les lignes réelles et simulées laissent entrevoir les possibilités d'une telle méthode dans la compréhension et l'interprétation des cubes sismiques.

### 2.3.5 (o) Stratigraphie séquentielle et architecture sédimentaire haute résolution de l'oolithe blanche du bassin parisien

Benoît Issautier<sup>1</sup>, Eric Lasseur<sup>1</sup>, Pierre-Yves Collin<sup>2</sup>, Mathilde Pantel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>Biogéosciences, Dijon

La formation carbonatée de l'Oolithe Blanche (Bathonien) est un aquifère salin profond majeur, exploité pour sa chaleur et ciblé pour du

stockage d'énergie. Elle a été historiquement intensément décrite d'un point de vue sédimentologique et stratigraphique en particulier sur les affleurements de Bourgogne. Ces études ont permis de définir un profil de dépôt de type rampe carbonatée qui varie entre une rampe ouverte et une rampe barrée.

En subsurface, les géométries sédimentaires restent encore peu connues : seules les grandes MFS sont identifiées. Or les récentes études réservoirs ont démontré qu'il était nécessaire de comprendre plus finement l'architecture de l'Oolithe Blanche ainsi que la nature et connectivité des corps poreux. Cette étude propose, au travers de corrélations diagrapiques, de caractériser la rampe carbonatée du Dogger (géométries sédimentaires et faciès). La zone d'étude s'étend entre Troyes et Paris afin de couvrir la zone géothermique qui nous permet de caler les électrofacies via une étude microfaciès sur cuttings, et le secteur Est (peu poreux) qui au travers de l'étude de 2 carottes (champ de Villeperdue) nous permet de caler les électrofacies plus internes.

Les corrélations sont réalisées au 3<sup>ème</sup> ordre, ce qui nous a permis de monter en résolution et de subdiviser les grands cycles en 7 cycles mineurs. Ces cycles s'expriment par des géométries assez lisses et continues qui montrent une dynamique de rampe déposée principalement en aggradation/rétrogradation et caractérisée par un profil de dépôt très peu penté, entraînant des variations de faciès rapides en réponse à des variations du niveau marin relatif. La majorité du volume de matériel est déposée dans les demi-cycles transgressifs avec une tendance à l'aggradation qui montre que la production carbonatée y est maximum et compense quasiment la création d'espace disponible. Les phases d'ennoiement se traduisent fréquemment par de la condensation en sommet des faciès de barrière, ce qui entraîne la création d'importants drains hydrodynamiques.

Les corrélations de 4<sup>ème</sup> ordre montrent en diagrapie et sur le terrain une forte variabilité qui correspond à des cycles à très haute fréquence. Ils témoignent d'une forte hétérogénéité suggérant une géométrie de shoal très complexe. Ces perspectives sont à développer car elles sont fondamentales dans la gestion locale des projets d'exploitation du réservoir.

### 2.3.6 (o) Microfracturing in quartz grains as a measurement of effective stress evolution in sandstone reservoirs

Kaveh Mehrkian<sup>1,2</sup>, Jean-Pierre Girard<sup>2</sup>, Charles Aubourg<sup>1</sup>, Guilhem Hoareau<sup>1</sup>, Francois Dugas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

One major factor controlling reservoir quality in sandstones is the evolution of effective stress/pore pressure during burial. The traditional way to obtain constraints on paleo-pressure history relies on fluid inclusion studies and/or basin modeling efforts. Our work aims at developing a new method to directly unveil the history of effective stress/pore pressure evolution by quantifying microfracturing density in quartz grains in clastic reservoirs.

It has been shown that there is a linear relationship between quartz grain fracturing (brittle deformation) and the increase of effective stress in sandstones under hydrostatic conditions. This documented relationship will be used to reconstruct paleo burial history in presently overpressured and deeply buried clastic reservoirs. North Sea reservoirs were chosen to develop and calibrate a reference law linking microfracturing and effective stress ; this was motivated by the prevalence of extensive tectonic regime in the basin and the variability of present-day overpressures in the reservoirs.

Mesozoic sandstone reservoirs ranging in depths between 2.5 and 4.0 km and present-day pore pressure of 5 to 50 MPa were selected. Detailed SEM-CL imaging is used to visualize and quantify quartz cemented

microfractures (2-10 $\mu$ m aperture) in quartz grains. Depending on grain size, a total number of 1000 to 1500 grains per sample are counted and density of fractured quartz grains is calculated.

Preliminary results confirm a relationship between effective stress, present-day depth and microfracturing, and allow us to investigate the timing of overpressure onset in various fields.

### 2.3.7 (p) Modélisation 3D en contexte de tectonique salifère : le mini-bassin du « Crocodile » à Sivas (Turquie)

Pauline Collon-Drouaillet<sup>1</sup>, Alexandre Pichat<sup>1</sup>, Océane Favreau<sup>1</sup>, Gaétan Fuss<sup>1</sup>, Gabriel Godefroy<sup>1</sup>, Marine Lerat<sup>1</sup>, Antoine Mazuyer<sup>1</sup>, Marion Parquer<sup>1</sup>, Guillaume Caumon<sup>1</sup>, Julien Charreau<sup>4</sup>, Jean-Paul Callot<sup>1</sup>, Jean-Claude Ringenbach<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GeoRessources, Nancy

<sup>2</sup>LFC-R, Pau

<sup>3</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>4</sup>CRPG, Nancy

Imperméable, de faible densité et visqueux à l'échelle des temps géologiques, le sel joue un rôle tectonique unique favorisant la formation de pièges à hydrocarbures. Mais les structures liées à l'halocinèse sont aussi diverses que difficiles à imager par les techniques sismiques classiques. De ce fait, les analogues de surface accessibles sont des objets d'étude précieux et recherchés. Après la réinterprétation depuis septembre 2011 de l'ensemble de ses dépôts évaporitiques (projet UPPA-TOTAL), le bassin Oligo-Miocène de Sivas (Turquie) est probablement un des analogues de terrain le plus riche au monde pour l'étude de la tectonique salifère. La qualité des affleurements et des images satellites caractérisent cette zone regroupant une grande variété de géométries associées à l'halocinèse : mini-bassins, diapirs, canopées, sutures ...

Alors que l'étude de ces structures passe par un évident travail de terrain, comprendre leur organisation spatiale et vérifier la cohérence tridimensionnelle d'une interprétation conceptuelle peut être amplement facilité par la construction de modèles numériques 3D.

À partir d'analyse d'images satellites et de mesures de pendages, les travaux présentés ici s'attachent à reconstruire la géométrie 3D du mini-bassin du « Crocodile ». Positionné sur un ancien émissaire diapirique, ce dernier est rempli de sédiments lacustro-sebkhaïques et présente une structure en synclinal refermé percé au Sud par un diapir central autour duquel deux synclinaux très serrés se sont individualisés.

La surface du diapir est modélisée par une approche implicite combinée à l'utilisation de NURBS. Le remplissage du mini-bassin est ensuite modélisé dans la zone concernée en utilisant une combinaison d'approches explicites et implicites récemment développées. Le résultat met en valeur la structure géométrique particulière de l'ensemble et montre l'utilité de nouvelles méthodes de modélisation pour faciliter une généralisation plus automatisée de telles représentations.

### 2.3.8 (p) Les caractères pétrophysiques, ichnofaciès et faciès des corps triasiques du Haut-Atlas de Marrakech-Maroc

I. Konotio<sup>1</sup>, A. Lagnaoui<sup>2</sup>, E. H. Chellai<sup>1</sup>, I. Fabuel-Perez<sup>3</sup>, J. Redfern<sup>3</sup>, N. Youbi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Marrakech, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc

<sup>2</sup>Université d'El Jadida, Maroc

<sup>3</sup>Université de Manchester, Manchester, UK

De manière générale, les dépôts du Trias se mettent en place dans des zones à reliefs variés et dans un contexte tectonique distensif. L'analyse de la carte des faciès, montre la prédominance des dépôts salifères et en particulier la grande extension des séries à halite et sels potassiques. La répartition des évaporites témoigne d'une origine marine. L'essentiel des formations triasiques est reporté au Trias supérieur. Ceci n'empêche que les travaux récents ont mis en évidence le Trias moyen voire même le Trias inférieur.

Dans le Haut-Atlas de Marrakech (Maroc), la succession des dépôts triasiques fournissent d'excellents analogues d'affleurement pour les systèmes continentaux à influence marine au sein d'un bassin de rift intramontagneux et permettent l'étude des faciès et le contrôle de la tectonique et du climat sur les dépôts.

Cette étude se focalise sur l'analyse de la Formation de grès de l'Oukaimeden (F5) sur l'ensemble des Hauts-Plateaux du versant nord. Elle montre une formation dominée par des dépôts fluviaux déposés dans un cadre de rift actif. L'analyse sédimentologique permet la description et l'interprétation des faciès détaillée.

La formation de grès de l'Oukaimeden est composée de corps gréseux chenalisés alternant avec des dépôts silteux-argileux lenticulaires, formant des barres de grès fluviaux et de faciès de débordements. En alternance avec les faciès fluviaux, des grès éoliens et des dépôts de cônes alluviaux sont également observés.

Cette formation comprend trois membres :

Le membre inférieur déposé par un système fluvial éphémère. Le membre médian enregistre un changement des conditions fluviales en tresses en réponse à la tectonique combinée avec un changement climatique vers des conditions plus humides. Le membre supérieur est caractérisé par le retour à des conditions éphémères combiné avec l'apparition de dunes éoliennes. Ce dernier montre l'enregistrement d'une aridité croissante. La partie supérieure du présent membre montre une influence de la marée, suite à une incursion marine dans le bassin. Ceci se confirme et persiste lors de la mise en place de la Formation F6.

L'ensemble de la série triasique est coiffée par un événement volcanique attribué à la CAMP (Central Atlantic Magmatic Province).

Les caractères pétrophysiques des dépôts en relation avec le caractère réservoir de ces formations seront discutés ainsi que les ichnofaciès.

### 2.3.9 (p) Métaux et radionucléides des roches-mères d'hydrocarbures : minéraux porteurs et minimisation de l'impact lixiviant des eaux injectées et produites

Jérémy Lerat<sup>1</sup>, Jérôme Sterpenich<sup>1</sup>, Eric Gaucher<sup>2</sup>, Régine Mosser-Ruck<sup>1</sup>, Jacques Pironon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GeoRessources, Nancy

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

Les formations peu perméables que sont les shales constituent une ressource majeure et démontrée en gaz naturel et en pétrole. Cependant, ces formations sont en général enrichies en éléments métalliques et en radionucléides (Vine et Tourtelot, 1970). Ces éléments peuvent être extraits de la roche (lessivage) et potentiellement être transportés par les eaux de production. Les coûts de traitement des eaux contaminées sur les sites d'exploitation seront d'autant plus élevés que les concentrations en éléments toxiques et/ou radioactifs seront fortes. Il apparaît donc nécessaire d'entreprendre une étude expérimentale en laboratoire pour comprendre les interactions entre les eaux injectées et produites et les shales. L'objectif est de proposer de nouveaux additifs afin de diminuer la réactivité des eaux injectées pour les rendre peu ou non impactantes lors de leur production en retour. Notre étude consiste d'abord en une caractérisation fine des shales, en particulier leur texture et l'identification des minéraux porteurs des éléments métalliques

et des radionucléides, puis en des essais de lixiviation permettant de connaître la nature des éléments toxiques lessivés et quantifier leur taux d'extraction. En couplant cette étude expérimentale et des modélisations numériques des équilibres eau-roche, différentes formulations de la chimie des fluides injectés pourront être testées en laboratoire et proposées afin de limiter la dissolution des minéraux porteurs. Le challenge est de rester compatible avec les contraintes géomécaniques imposées par les opérations de développement des productivités en hydrocarbures tout en limitant la réactivité chimique des eaux injectées vis-à-vis des roches-mères.

Vine, J. D. et Tourtelot, E. B. (1970). Geochemistry of black shale deposits - a summary report. *Econ. Geol.* 65, 253-272.

### 2.3.10 (p) Combinaison d'outils pétrophysiques pour la caractérisation de systèmes géologiques poreux. Application à des systèmes réservoirs

Serge Galaup<sup>1</sup>, Léa Pigot<sup>1</sup>, Cerepi Adrian<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Géoressources et Environnement, Pessac*

La géométrie de l'espace poreux et la capacité du pétrole à circuler dans cet espace vont conditionner les possibilités d'extraction du liquide dans les roches réservoirs. Nous proposons ici de comparer le résultat de plusieurs méthodes de caractérisation pétrophysique sur des roches de types réservoirs. Ces roches à dominante carbonate ou dolomites ont été sélectionnées pour leurs grandes diversités en terme de porosité et de perméabilité.

Les techniques utilisées pour cette étude sont multiples : la première est aussi celle qui est la plus employée dans le domaine pétrophysique, c'est la porosité par intrusion de mercure (MIP). Elle est largement utilisée pour déterminer la distribution des pores des matériaux mesoporeux, mais elle comporte des limitations qui concernent notamment les dommages causés sur les microstructures ou lorsque cette technique est appliquée aux matériaux qui ont une géométrie de pores irrégulière. Nous avons associé cette technique à 2 autres. La relaxométrie RMN, et une méthode de caractérisation de l'espace poreux par injection d'un métal en fusion (métal de Wood) dans le réseau poreux en vue d'un examen microscopique (WMIP).

Ces 2 techniques sont complémentaires à la porosimétrie mercure. La seconde méthodologie concerne l'injection d'un métal en fusion (le métal de Wood, alliage à bas point de fusion). Ce métal est justifié par le fait qu'il est réputé non mouillant et de plus étant solide à température ambiante, il permet de « figer » des microstructures de pores et fissures dans différentes conditions de pression (pore et confinement). Il est ainsi possible de déterminer visuellement les pores fermés, les pores ouverts et le degré d'envahissement du réseau versus la pression d'injection. L'examen au microscope électronique à balayage de telles préparations offre l'avantage, de présenter un fort contraste et ainsi de faciliter la segmentation de l'image.

Enfin, nous avons corrélié ces différentes mesures avec la relaxométrie RMN. En effet, l'analyse des temps de relaxation des atomes permet d'obtenir des informations sur l'arrangement spatial, la dynamique des molécules étudiées notamment l'eau, les propriétés électroniques et magnétiques des échantillons étudiés. Nous avons pu notamment corréler et quantifier le réseau poreux ouvert et fermé dans ces échantillons. Des mesures complémentaires en BET ont également été conduites.

### 2.3.11 (p) Etude Stratigraphique, sédimentologique et paléogéographique des séries paléozoïques du nord du bassin de Ghadamès et de la Jefarah en Libye et en Tunisie. Caractérisation des réservoirs potentiels

Adel Jabir<sup>1</sup>, Jean-Loup Rubino<sup>2</sup>, Adrian Cerepi<sup>1</sup>, Corinne Loisy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*ENSEGID, Pessac*

<sup>2</sup>*TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau*

L'objectif de ces recherches est la compréhension stratigraphique et paléogéographique des séries sédimentaires paléozoïques qui combleront le bassin de Ghadamès et son prolongement septentrional constitué par le bassin de la Jefarah en Libye et en Tunisie. Ces formations appartiennent au cycle gandwanien et sont, classiquement, interprétées comme se déposant dans un bassin cratonique tronqué par la discordance hercynienne.

Cette étude s'appuie sur une base de données puits permettant de réaliser des corrélations stratigraphiques entre puits en utilisant les cycles de second ordre, de produire des cartes de faciès d'isopaques et de paléogéographies des différentes unités stratigraphiques. Les cartes, notamment les cartes d'isopaques servent, ensuite, à discuter la nature de la déformation et à clarifier les comportements des zones hautes régionales actives durant le paléozoïque en les comparant avec les cartes dérivant de la sismique. Ces études permettent de prédire la localisation et la géométrie des systèmes réservoirs de ces séries paléozoïques mais aussi leurs évaluations en terme de propriétés.

En effet, des études plus poussées à base de carottes permettent d'affiner la caractérisation pétrophysique des principaux niveaux réservoirs du paléozoïque dans le bassin notamment, le Cambrien supérieur, l'Ordovicien Supérieur (Unité IV et Mammunyat) ainsi que les réservoirs siluriens (Fm Akakus) présents dans le champ de Tigi dans le Jefarah.

### 2.3.12 (p) Testing the clumped isotope palaeothermometer in deeply buried dolomitised carbonate reservoirs

John Macdonald<sup>1</sup> Cedric John<sup>1</sup>, Jean-Pierre Girard<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>*Imperial College London, Dept. Earth Science and Engineering, Royaume-Uni*

<sup>2</sup>*TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau*

Dolomitisation is a key factor in carbonate reservoir quality. The clumped isotope palaeothermometer offers a potential method to determine both the temperature of dolomitisation, as well as fingerprint the isotopic composition of the dolomitising paleo-fluid, therefore providing a valuable tool for reservoir characterisation.

First we present clumped isotope data from reservoir dolostones buried to ~3-4 km from offshore West Africa where there are fluid inclusion constraints. Fluid inclusion (Th) temperatures record a range of temperatures from ~100-160 °C, interpreted to record burial recrystallisation, as well as subsequent resetting through stretching and further burial. Clumped isotopes, however, record temperatures clustering around 100 °C, interpreted to record burial recrystallisation only. Palaeo-fluid  $\delta^{18}O$  (SMOW) compositions of ~3-4 ‰ were calculated from clumped isotope temperatures, typical of a basinal brine. Palaeo-fluid  $\delta^{18}O$  calculated from fluid inclusion temperatures, however, recorded more extreme compositions of 6-10 ‰. Therefore, clumped isotopes has been a valuable tool in constraining the thermal history, and indirectly the timing, of massive burial dolomitisation in this reservoir.

We also present clumped isotope data from a suite of Upper Jurassic dolostones and limestones from the Aquitaine Basin, southwest France.

Early Cretaceous rifting led to burial of these carbonates [1] to depths ranging from 1.0 to 5.5 km, depending upon their location in the basin. Limestones and fine-grained dolostones from 1.0 to 5.5 km burial depth record temperatures of 40-60 °C. Coarser-grained dolostones from 3.0 to 5.5 km recorded temperatures of 80-150 °C. This suggests that the fine-grained dolostones are recording an earlier dolomitisation event which has been locked in their clumped isotope systematics but the coarser-grained dolostones continued to recrystallise with further burial. The finer-grained dolostones record palaeo-fluid  $\delta^{18}\text{O}$  compositions of 0-4 ‰ (SMOW) while the coarser-grained dolostones have heavier  $\delta^{18}\text{O}$  compositions, indicating recrystallisation in the presence of heavier, deeper basinal brines.

[1] Biteau et al. (2006) *Pet. Geo.* 12, 247-273.

### 2.3.13 (p) Contribution of the Sonic Scanner tool in the understanding of fractured reservoirs, a case study from the Algerian Sahara

Sid-Ali Ouadfeul<sup>1</sup>, Leila Aliouane<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Algerian Petroleum Institute, Boumerdes, Algérie*

<sup>2</sup>*LABOPHYT, Faculté des hydrocarbures et de la chimie, boumerdes, Algérie*

Here, we show a case study of the contribution of the sonic scanner tool in the understanding of a tight sand fractured reservoir located in the Algerian Sahara using shear wave anisotropy. The sonic scanner records the fast and slow shear wave slowness; this can provide an idea about the velocity of the shear wave anisotropy. The azimuth of the fast shear wave is able to give the fractures azimuths since if we assume that the reservoir target is an HTI model the azimuth of the fast shear wave is parallel to the fractures azimuth.

The maximum and the minimum cross energies of the shear wave well-logs can be used to quantify the degree of anisotropy of the shear wave. Combination of these logs with the bulk density and the Poisson's ratio well-logs can help greatly to predict the fluid nature that exists in the fractures.

## 2.4 Processus et enregistrements sédimentaires dans les canyons et les bassins profonds (ASF)

### Responsables :

- Serge Berné (Perpignan)  
serge.berne@univ-perp.fr
- Thierry Mulder (EPOC, Bordeaux)  
t.mulder@epoc.u-bordeaux1.fr

### Résumé :

Les marges continentales (du rebord du plateau jusqu'aux plaines abyssales) représentent une faible partie des domaines océaniques, mais elles concentrent les processus et dépôts sédimentaires issus des continents (marges silico-clastiques) et/ou produits *in situ* (marges carbonatées). Elles sont à l'origine d'une part importante des séries sédimentaires fossiles, où elles fournissent des réservoirs variés. Cette session est consacrée aux différents aspects de l'étude de ces environnements, des processus qui les affectent, des dépôts qui s'y forment et des séquences qui les caractérisent, aussi bien pour les environnements marins quaternaires que pour les séries anciennes. Parmi les sujets proposés pour cette session, on notera : étude des processus actifs sur les pentes et les bassins, caractérisation sédimentologique, modélisation analogique et numérique des processus gravitaires, des séquences et des corps sédimentaires, impact des changements climatiques et glacio-eustatiques sur les systèmes sédimentaires, application de la stratigraphie séquentielle aux séries profondes. Sont également bienvenues les études liées aux habitats spécifiques des domaines profonds, et aux aspects environnementaux en lien avec le transfert des contaminants.

### 2.4.1 *Keynote communication* : Onset, development and persistence of prograding submarine canyons revealed by 3D seismic data : the Ebro Margin, NW Mediterranean

Roger Urgeles<sup>1</sup>, Ben De Mol<sup>1,2</sup>, David Amblàs<sup>3</sup>, Jason Canning<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Institut de Ciències del Mar, Barcelona, Espagne*

<sup>2</sup>*Now at Senergy AS Oslo - Norvège*

<sup>3</sup>*Universitat de Barcelona Barcelona, Espagne*

<sup>4</sup>*British Gas Exploration and Production Limited Reading, Royaume-Uni*

The Ebro margin, NW Mediterranean, has experienced significant sediment input during the Plio-Quaternary, which translates into extensive progradation. A conspicuous feature of the Ebro margin is a dense network of submarine canyons. These canyons are incised <500 m on the upper continental slope and evolve into channel-levee complexes at the base of the slope. The mechanisms by which those submarine canyons (and many others around the world oceans) form and evolve are still poorly constrained. A 40km x 60 km 3D seismic data set from the Ebro Margin sheds new light on the processes driving initiation and subsequent evolution of these features in sediment-flushed continental margins. From this dataset, it is apparent that major fluvial valleys excavated during the Messinian had little control on the subsequent submarine drainage network that developed after Zanclean reflooding. Amplitude and coherency attributes display Quaternary fluvial streams that reach the shelf edge during lowstand periods near submarine canyon heads. Coherency time slices show that proper canyons initiated in the early Pleistocene. These two facts suggest that transition from a climate dominated by the 41 kyr Earth precession cycles into a climate dominated by the 100 kyr obliquity of the Earth's orbit and associated changes in sea-level amplitude were largely at the origin of the submarine canyons. From mid-Pleistocene times, development of submarine canyons was likely favored by 1) fluvial systems reaching the shelf edge during lowstands and 2) significantly increased sediment yield because rivers were prevented from establishing equilibrium state. Submarine canyon-fill deposits and a series of paleo-canyons indicate net-accumulation of the canyons system and progradation with the remainder of the continental margin. The submarine canyons evolved into larger systems throughout Pleistocene, increasing their shelf drainage area and likely the magnitude and frequency of sediment flows.

### 2.4.2 *Keynote communication* : Impact of bottom trawling on the morphology and sediment dynamics of La Fonera submarine canyon, northwestern Mediterranean

Pere Puig<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institut de Ciències del Mar (ICM-CSIC), Barcelona - Espagne*

The physical disturbance of the deep-sea environment by the offshore displacement of commercial bottom trawling is a matter of concern. However, its effects on sediment resuspension and dispersal across continental margins and on the alteration of seafloor morphology still remain unaddressed. A focused study was conducted in La Fonera (Palamós) submarine canyon, where a bottom trawling fishing fleet operates on a daily basis, mainly at depths from 400 to 800 m. To assess the effects of trawling on the sedimentary dynamics, a moored line equipped with a downward-looking ADCP and several turbidimeters was deployed within a tributary valley on the canyon flank, slightly deeper than the maximum trawling depth. Time series revealed a nearly daily occurrence of sediment gravity flows linked to the passage of the trawling fleet. Increases of near-bottom suspended sediment concentrations and current

velocities were observed repeatedly during weekdays at working hours, indicating a periodic sediment removal from fishing grounds. Such sediment dispersal propagates deeper, altering natural sediment accumulation rates along the main canyon axis. Additionally, a high-resolution multibeam bathymetry from the upper canyon was combined with the Vessel Monitoring Systems (VMS) positions obtained from local trawlers, evidencing a noticeable smoothing of bottom topography in the canyon flank regions affected by bottom trawling. Sediment coring and direct ROV inspections on both trawled and untrawled canyon flank sections also revealed a dramatic change of the original sediment properties and small-scale morphological complexity. These findings suggest that during the last decades following the industrialization of fishing fleets, bottom trawling has become an important driver altering the sedimentary dynamics and the deep seascape evolution, particularly in relatively steep continental slope environments, such as those found in large portions of the flanks of submarine canyons.

### 2.4.3 (o) Modelling trawling-induced sediment fluxes in a Mediterranean submarine canyon

Marta Payo Payo<sup>1</sup>, Ricardo Silva Jacinto<sup>2</sup>, Galderic Lastras<sup>3</sup>, Miquel Canals<sup>3</sup>, Marina Rabineau<sup>1</sup>, Nabil Sultan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*IUEM, Plouzané*

<sup>2</sup>*IFREMER, Plouzané*

<sup>3</sup>*CRG Marine Geosciences, Department of Stratigraphy, Palaeontology and Marine Geosciences, Faculty of Geology, University of Barcelona, Espagne*

Bottom-trawling is one of the anthropogenic activities with a stronger and more widespread impact on the seafloor. Physical processes involved in sediment resuspension due to trawling and the resulting sediment-laden flows are not fully understood. The amount and fate of remobilized sediments are of the utmost relevance for current continental margin sediment budgets. Resuspension by bottom trawling leads to massive transfer of sediment from shallower to deeper areas practically worldwide. Most of the studies addressing the physical disturbances linked to trawling are based on observations over the continental shelf and slope. La Fonera submarine canyon is a large active canyon in the NW Mediterranean Sea, which is deeply incised into the continental shelf. It presents complex sediment transport dynamics associated to littoral drift and extreme events such as dense shelf water cascading and severe storms. Recent studies revealed recurrent peaks in near-bottom current speed and suspended sediment concentration synchronous with bottom trawl fishing. A numerical process-based model developed to reproduce underwater sediment-laden flows is implemented to La Fonera canyon. Our aim is to simulate sediment-loaded fluxes triggered by trawling and their interaction with the seafloor. In situ monitoring data is used both to calibrate the modelled sediment fluxes and to reliably reproduce sediment flows due to trawling. Good agreement between model and monitoring data is found. Peaks in SSC values exceed 120mg/l and peaks in current speed are up to 40cm/s at the mooring site. Moreover, we obtain the propagation patterns of trawl-induced sediment flows from the fishing ground downward the canyon. Our results confirm the value of numerical models to complete and enlarge our understanding of the sedimentary transfer processes from shallow to deep in the ocean. This study also sets the foundation for the in-depth research of processes involved in trawling-induced turbidity currents.

#### 2.4.4 (o) Remplissage de la tête de canyon Bourcart (Méditerranée occidentale) pendant le dernier cycle glacio-eustatique de 100.000 ans : importance des connexions fluviales

Marie-Aline Mauffrey<sup>1</sup>, Serge Berné<sup>1</sup>, Gwenaél Jouet<sup>2</sup>, Matthieu Gaudin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CEFREEM, Perpignan

<sup>2</sup>Géosciences Marines, Plouzané

<sup>3</sup>Tullow oil, London

Les canyons sous marins sont souvent considérés uniquement comme une étape de transit des sédiments du continent vers des systèmes profonds d'accumulation (les deep-sea fans). Située entre 120 m et environ 500 m de profondeur dans le Golfe du Lion, la tête du canyon Bourcart a favorisé l'accumulation à haute résolution d'une importante colonne sédimentaire donnant ainsi accès à une archive détaillée (jusqu'à 500 m) des processus qui l'ont affectée durant le dernier cycle Glaciaire/Interglaciaire (derniers 100.000 ans). Les profils sismiques (Chirp et Sparker) couplés aux datations du forage profond PROMESS permettent d'établir le cadre chronologique de l'évolution de la tête du canyon et en particulier de quantifier la part des dépôts transgressifs préservés. L'évolution du canyon Bourcart et la progradation de la marge, sont principalement dues aux connexions fluviales apportant les sédiments directement dans la tête du canyon entre environ 38 et 17 ka BP. Ces connexions et les dépôts au sein de cette tête de canyon sont directement en phase avec l'eustatisme glaciaire comme l'attestent les deux dépôts gravitaires importants (Mass Transport Deposits) cartographiés ; ils surviennent à la fin des cycles de Bond et ponctuent une chute du niveau marin, entre 38 et 24 ka BP. La part la plus importante de sédiments préservés correspond néanmoins à l'intervalle transgressif, du fait de l'augmentation de l'accommodation et d'un flux sédimentaire important au début de la déglaciation. La présence de systèmes de chenaux/levées confinés, surmontés par des faciès fluviales, atteste de la connexion de fleuve(s) à la tête du canyon. La cartographie en 3 dimensions des chenaux montre une migration de ceux-ci. Le système le plus récent présente une morphologie méandrique suggérant l'existence de courants hyperpycnaux générés à l'embouchure du fleuve et se propageant directement dans le canyon.

#### 2.4.5 (o) Le système Capbreton-Santander : illustration des processus sédimentaires actifs dans les canyons modernes depuis 15 000 ans

Sandra Brocheray<sup>1,2</sup>, Michel Cremer<sup>2</sup>, Sébastien Zaragosi<sup>2</sup>, Sabine Schmidt<sup>2</sup>, Hervé Gillet<sup>2</sup>, Linda Rossignol<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

<sup>2</sup>EPOC, Talence

Le canyon de Capbreton se singularise des autres canyons du Golfe de Gascogne par sa proximité à la côte. La tête du canyon s'initie dès 30 mètres d'eau et donne naissance à un thalweg sinueux encaissé dans un canyon étroit aux flancs raides. Le thalweg de Capbreton s'étend sur plus de 270 km jusqu'à 3 000 mètres de profondeur où il connaît un brusque changement de direction vers le Nord pour se prolonger dans le canyon de Santander. A cette profondeur, le canyon de Santander présente une morphologie en U, plus large et moins haute que le canyon de Capbreton, illustrant la transition entre canyon profondément incisé et chenal profond.

En parallèle de cette évolution morphologique, les différents carottages réalisés dans ces canyons illustrent une évolution de la dynamique sédimentaire depuis l'amont du canyon de Capbreton jusqu'à la terminaison

du canyon de Santander.

A 80 km de la tête du canyon de Capbreton, perpendiculaire au thalweg, un transect de quatre carottes illustre les différents processus en action dans le canyon sur une même verticale : (1) une sédimentation gravitaire en masse au c ?ur du thalweg, (2) des événements turbiditiques fins sur les terrasses basses (< 200 m par rapport au thalweg), à une fréquence moyenne d'une turbidite/an lors des derniers 2 000 ans et (3) de la décantation liée aux nuages néphéloïdes, alimentés par les panaches turbides sur les terrasses hautes (> 200 m). Dans la terminaison du canyon de Santander, prélevée le long d'un méandre considéré jusqu'alors abandonné, une carotte montre 8 m de dépôts turbiditiques sableux dont l'analyse stratigraphique indique une alimentation continue au cours des derniers 15 000 ans, mais avec des taux de sédimentation holocènes 6 fois plus faibles que sur les terrasses du canyon de Capbreton.

Ainsi même si le canyon de Capbreton, et plus particulièrement ses terrasses, fonctionnent comme de véritables pièges à sédiments régionaux, une part non négligeable de ses apports sédimentaires atteint tout de même les grands fonds à l'Holocène, ce qui est tout à fait singulier en comparaison des autres grands canyons du Golfe de Gascogne.

#### 2.4.6 (o) Mass-Transport « Deposits » : Going beyond the misnomer

Patrice Imbert<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

The concepts of Mass-Transport Deposit (MTD) or Mass-Transport Complex (MTC) were initially coined to describe chaotic seismic units on exploration 2-D lines. At that time, the chaotic character only made it possible to infer that the emplacement was related to slope failure / mass transport. Subsequent improvement of seismic quality has made it possible to go much deeper into the characterization of these units. The use of the terms MTD and MTC now leads to confusion, especially as regards the processes involved. In particular, most papers abundantly use the notion of « deposition » for MTCs and MTDs both in places where such a notion is legitimate and in the proximal reaches where removal of material exceeds addition, so that ?deposition ? actually corresponds to a net loss of sediment. As a result, the terms that were useful when initially defined appear to have lost some of their practical use, and even start limiting or even obscuring research. It is proposed to restrict the term of « MTD » to actual deposits from mass transport, i.e. in places where new sediments were added to the sedimentary pile. In parallel, it is suggested to look in a more general way at the sedimentary result of slope failure, which includes ablation in the upslope part and deposition in the lower reaches. In order to keep new jargon minimal, it is proposed to use the notion of « Mass Transport System » to encompass the full array of features related to one episode of mass failure, from the most proximal slump scar down to the most distal deposits (which may include turbidites). MTDs would correspond to the middle part of most such systems. A variety of systems types can be distinguished, in particular on the basis of the spatial relationships between the upslope depletion area (where the net sedimentary budget is negative) and the downslope accumulation area (positive budget). Some systems are simple, others may be composite with a first failure triggering one or several others, upslope or downslope. In addition, sedimentary depletion in the upslope part of mass-transport systems may induce depressurizing and trigger sediment remobilization, as observed in the South Caspian Basin.

### 2.4.7 (o) Origine et processus sédimentaires des dépôts turbiditiques générés par des événements extrêmes sur le prisme Calabrais (Mer Ionienne)

Laurine San Pedro<sup>1</sup>, Nathalie Babonneau<sup>1</sup>, Marc-André Gutscher<sup>1</sup>, Antonio Cattaneo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IUEM, Plouzané

<sup>2</sup>IFREMER, Plouzané

La mer Ionienne est bordée par deux prismes d'accrétion associés à des zones de subduction : la ride méditerranéenne et le prisme calabrais. Cette région est soumise à de grands séismes de magnitude supérieure à 7, parfois associés à des tsunamis, au cours de la période historique. Ces événements extrêmes peuvent engendrer des déstabilisations sur les pentes sous-marines du sud de l'Italie, créant ainsi de grands courants de turbidité qui engendrent le dépôt de turbidites au fond du bassin Ionien.

Afin de mieux comprendre l'histoire sismique du prisme calabrais, notre étude vise à identifier les turbidites décrites dans les carottes sédimentaires, de pouvoir les corréler entre elles et les dater sur l'intervalle Holocène.

Cette étude est basée sur de nouvelles données, acquises durant la mission CIRCEE (N/O Le Suroit) en octobre 2013 : carottes, profils CHIRP et profils sismiques de haute résolution.

Les 12 carottes étudiées montrent des successions pélagiques alternant avec des dépôts turbiditiques. Des homogénéités plurimétriques, des tephres et des niveaux de sapropèles sont également décrits. Grâce à des analyses sédimentologiques, les dépôts liés à des événements extrêmes ont pu être identifiés. Les premières estimations d'âge ont été réalisées par corrélation avec les données de Polonia et al. (2013). La stratigraphie sera complétée et confirmée avec des datations au carbone 14, des études tephrochronologiques ainsi que par la corrélation avec les profils CHIRP.

Les dépôts turbiditiques déclenchés par les séismes de 1908 de Messine et ceux de 1693 et de 1542 en Sicile peuvent être reconnus au sommet des nouvelles carottes. De même, la mégaturbidite d'Augias, associée à un tsunami daté à environ 365 AD, est clairement identifiée et corrélées dans au moins six carottes.

Ce travail permettra une meilleure évaluation de l'aléa sismique et tsunamique dans le Sud de l'Italie par l'estimation des temps de récurrence et des cyclicités de ce type d'événement extrême.

### 2.4.8 (o) Qu'enregistre l'activité turbiditique sur le prisme Calabrais (mer Ionienne) sur les derniers 60 ka ?

Eléonore Köng<sup>1</sup>, Sébastien Zaragosi<sup>1</sup>, Jean-Luc Schneider<sup>1</sup>, Thierry Garlan<sup>2</sup>, Patrick Bachelery<sup>3</sup>, Chloé Seibert<sup>1</sup>, Laurine San Pedro<sup>4</sup>, Calypso Racine<sup>1</sup>, Marjolaine Sabine<sup>1</sup>, Cassandra Normandin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Talence

<sup>2</sup>SHOM, BREST

<sup>3</sup>LMV, Clermont-Ferrand

<sup>4</sup>IUEM, Plouzané

Le prisme calabrais est un prisme d'accrétion témoignant de la fermeture de l'océan Téthys due à la convergence des plaques lithosphériques Nubie et Eurasie. Il est situé dans la mer Ionienne au centre de la mer Méditerranée, entre l'Italie, la Sicile et la Grèce. C'est une zone géologiquement très active. En effet, une sismicité importante secoue régulièrement le sol italien et sicilien, accompagnée parfois par la formation de tsunamis. De plus, la subduction de la plaque Nubie sous la plaque Eurasie entraîne la formation d'un volcanisme d'arrière-arc, l'arc Eolien,

dont les volcans principaux sont l'Etna, les Champs Phlégréens, les îles Eoliennes...

Lors de la mission océanographique du SHOM (service hydrographique et océanographique de la marine) MOCOSÉD2012, plusieurs carottes sédimentaires ont été effectuées dans des bassins intra-pente formés par les rides d'accrétion du prisme. Ces carottes enregistrent une importante activité turbiditique non chenalisée.

L'analyse de ces avalanches sous-marines a pour but, dans un premier temps, de mettre en évidence les sources et les mécanismes de leur déclenchement. Dans un second temps, de réaliser un calendrier des événements. Les datations ont été effectuées au radiocarbone sur des foraminifères planctoniques et par téphrochronologie. Le climat, la sismicité, le volcanisme, les tsunamis, sont autant de sources potentielles qu'il faut démêler afin de comprendre le fonctionnement de la sédimentation sur le prisme calabrais.

### 2.4.9 (o) Architecture et histoire sédimentaire récente de la zone amont du système turbiditique du Gange-Brahmapoutre (baie du Bengale)

Lea Fournier<sup>1</sup>, Sébastien Zaragosi<sup>1</sup>, Kelly Fauquembergue<sup>1</sup>, François Leparmentier<sup>2</sup>, Franck Bassinot<sup>3</sup>, Ronan Joussain<sup>4</sup>, Eva Moreno<sup>5</sup>, Catherine Kissel<sup>3</sup>, Thibault De Garidel-Thoron<sup>6</sup>, Philippe Martinez<sup>1</sup>, Christophe Colin<sup>4</sup>, Frédérique Eynaud<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Talence

<sup>2</sup>TOTAL, Paris-La Défense

<sup>3</sup>LSCE, Gif-Sur-Yvette

<sup>4</sup>Université Paris sud (Paléoclimats et dynamique sédimentaire), Orsay

<sup>5</sup>MNHN, Paris

<sup>6</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

Le système turbiditique de la baie du Bengale est le plus grand système répertorié à ce jour (Curry et al., 2003). Il est alimenté principalement par les fleuves Gange et Brahmapoutre. La baie du Bengale se caractérise par un plateau continental très large au niveau des deltas du Gange-Brahmapoutre et de l'Irrawaddy (environ 250 km) et une pente continentale abrupte sur l'ensemble de la baie. Les données acquises lors de la mission MONOPOL en 2012 ont permis d'étudier l'activité turbiditique du système Gange-Brahmapoutre à travers des carottes sédimentaires situées sur les levées d'un chenal actif actuellement et d'un chenal inactif. Si l'une des carottes longues couvre un enregistrement sédimentaire de 200 000 ans (MD12-3412) sur le bord d'un chenal inactif, la seconde couvre les derniers 10 000 ans (MD12-3417) sur la levée du chenal actif. Les données de sismique pétrolière et de bathymétrie multifaisceaux ont permis d'étudier la position et l'architecture des différents chenaux présents dans la baie du Bengale ainsi que leurs connections potentielles aux différents fleuves alimentant la baie.

Un canyon unique au nord de la baie du Bengale incise le plateau continental jusqu'au delta du Gange-Brahmapoutre, tandis que de nombreux canyons semblent limités en amont à la pente continentale. Ces canyons sont reliés en bas de pente à de larges vallées sous-marines très sinueuses. La reconstruction de l'activité de ces vallées met en évidence une migration latérale importante des apports sédimentaires au système profond. Si la mousson régule les apports sédimentaires dans la baie du Bengale, les résultats obtenus suggèrent une alimentation différente du système profond en haut et en bas niveau marin comme cela a été montré récemment pour le système turbiditique de l'Indus (Bourget 2013).

### 2.4.10 (o) Architecture et géométrie des dépôts Plio-Quaternaires de l'appareil sédimentaire gravitaire du Golfe de Gênes, Méditerranée occidentale

Quentin Soulet<sup>1,2</sup>, Sébastien Migeon<sup>3</sup>, Christian Gorini<sup>1</sup>, Jean-Loup Rubino<sup>2</sup>, Antonio Cattaneo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>3</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>4</sup>IFREMER, Plouzané

L'impact de la morphologie des canyons sur le comportement des écoulements gravitaires est un point crucial dans la compréhension de l'évolution architecturale des systèmes sédimentaires profonds. La potentielle connexion/déconnexion entre les dépôts de canyons et de bassins a une implication forte dans la connectivité longitudinale des corps sableux et donc un impact majeur sur les modèles réservoirs.

Dans cette étude, nous nous concentrons sur l'activité récente et sur l'analyse détaillée des architectures sédimentaires de deux canyons dans le Golfe de Gênes. Depuis le Pliocène, cette marge subit une inversion tectonique responsable de l'intensification de processus gravitaires sur la pente continentale. En se basant sur une base de données géophysiques variée (Bathymétrie, Sismique HR, CHIRP, SAR), ce travail a pour objectif de contraindre l'influence des structures liées au soulèvement sur l'architecture et le style de dépôts dans les canyons et à la transition canyon-bassin.

Dans le Golfe de Gênes, les canyons de Polcevera et de Bisagno coalescent à 2100m de profondeur pour former la vallée de Gênes qui alimente le bassin profond en sédiment. Le principal processus de transfert sédimentaire actif durant l'actuel highstand semble être la transformation de volumes déstabilisés en courants de turbidités embrasés. Les images de sonar latéral (SAR) et de chirp acquises dans les thalwegs de canyons permettent de discriminer trois motifs : (1) Dépôt de particules grossières/fines en structures de type « barre de méandre » et en aval des knickpoints, sur des pentes de 3-4° ; (2) Erosion sur des dépôts cohésifs mis en places précédemment par gel en masse, sur des pentes de 1-2° ; (3) Bypass sur le socle induré dans les zones d'augmentation de la pente, sur les 30km avant l'embouchure de la vallée de Gênes. Cette zone de bypass est responsable de la déconnexion entre les dépôts de canyon et l'accumulation distale dans le bassin.

L'accumulation distale d'environ 640km<sup>2</sup> se construit sans chenalisation à l'embouchure de la vallée de Gênes. D'après les données de carotte, les dépôts les plus récents sont constitués de séquences turbiditiques sableuses. L'accumulation se développe par l'empilement de corps lenticulaires migrants par compensation latérales et rétrogradant dans l'embouchure du canyon en réponse à la déformation de la marge.

### 2.4.11 (o) Caractérisation par pyrolyse Rock-Eval des sédiments des lobes terminaux du système turbiditique du Congo

François Baudin<sup>1</sup>, Anabel Aboussou<sup>1</sup>, Elsa Stetten<sup>1,2</sup>, Johann Schnyder<sup>1</sup>, Audrey Pruski<sup>2</sup>, Bernard Dennielou<sup>3</sup>, Karine Olu<sup>4</sup>, Christophe Rabouille<sup>5</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>LECOB, Banyuls sur Mer

<sup>3</sup>Laboratoire des Environnements Sédimentaires, Géosciences Marines, Plouzané

<sup>4</sup>IFREMER, Plouzané, France

<sup>5</sup>LSCE, Gif-sur-Yvette

Le Congo est le deuxième fleuve au monde par la superficie de son bassin versant (3,7 10E+6 km<sup>2</sup>) et par son débit (~ 43.000 m<sup>3</sup>.s-1). Du fait d'une topographie assez plane du bassin versant et de la présence de lacs qui piègent une partie de la charge solide, le rapport Carbone Organique Particulaire/Matières En Suspension (COP/MES) y est élevé. On estime que le Congo apporte chaque année 2,27 10E+6 t de COP à l'Atlantique Sud.

Une bonne partie de ce COP est rapidement transférée à grande profondeur par l'intermédiaire d'un vaste système turbiditique, actif même en période de haut niveau marin puisque la tête du canyon remonte jusque dans l'estuaire du Congo. Des sédiments riches en COP se déposent sur les levées lors du débordement des coulées turbiditiques mais aussi au niveau des lobes terminaux où viennent mourir les écoulements.

La zone des lobes, située vers 5000 m de fond et à près de 800 km de la côte, a été explorée en 2011 et 2012 lors des missions WACS et Congolobe. Des carottes Calypso et d'interface ont été prélevées dans différents secteurs, grâce notamment au ROV Victor 6000.

Des analyses Rock-Eval de ces sédiments argilo-silteux ont permis de caractériser quantitativement et qualitativement leur contenu organique. La présence de sels, précipités lors de la lyophilisation des sédiments, induit une ionisation parasite au cours de la pyrolyse Rock-Eval, faussant les résultats. Le rinçage à l'eau déminéralisée élimine ces sels mais aussi une fraction de la matière organique hydrolysable. Seule la déconvolution du signal Rock-Eval (assimilé à la somme de fonctions gaussiennes), permet de s'affranchir de cet effet parasite lié au sel.

Ainsi corrigés, les résultats des analyses Rock-Eval révèlent une grande homogénéité de la quantité (~3% Corg) et de la qualité de la matière organique (qui proviendrait à 75-80% du COP du fleuve) quels que soient les différents secteurs des lobes et les taux d'accumulation sédimentaire qui les caractérisent.

### 2.4.12 (o) Ecoulements granulaires sur pentes raides. Morphologies, structure des dépôts

Serge Ferry<sup>1</sup>, Danièle Grosheny<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université de Lyon, Villeurbanne

<sup>2</sup>GéoRessources, Nancy

Les programmes GDR Marges puis Action Marges ont été l'occasion d'étudier plusieurs systèmes gravitaires carbonatés courts, déposés sur pentes raides, dans le bassin subalpin français méridional. Dans trois exemples (Tithonien, Barrémien et Coniacien), se répètent les mêmes caractéristiques en tête de nappes bréchiqes resédimentées au pied des talus, avec vallée sous-marine tribulaire identifiée ou sans (tabliers multi-sources). Les coulées granulaires de brèches et/ou de calcarénites grossières développent en tête de dépôt des accumulations progradantes, générant des accréctions latérales apparentes aux affleurements. En position plus distale, la géométrie interne devient planaire ou massive, sans structure de dépôt apparente (sauf imbrication des clastes dans les brèches). La présence d'une pente raide et d'un fort ressaut hydraulique en bas de pente semblent les causes principales des géométries de dépôt observées. Celles-ci n'apparaissent pas ou peu dans les systèmes moins pentés, de facture "classique" (bassins de flysch).

Le cas extrême est représenté par des cônes d'éboulis sous-marin à forte pente (exemple : les brèches de bordure du bassin nummulitique des Aiguilles d'Arves) où le tablier est finement stratifié sur toute son épaisseur, semblable en cela aux cônes d'éboulis subaériens. Une structure analogue est rencontrée dans les cônes d'éboulis sous-marins de Rhodes, au moment du grand ennoyage momentané à la limite Pliocène-Pléistocène.

### 2.4.13 (o) Neogene stratigraphic architecture and dynamic evolution of the great Bahamas bank slope : role of resedimented carbonate deposits and bottom currents

Mélanie Principaud<sup>1</sup>, Jean-Pierre Ponte<sup>2</sup>, Thierry Mulder<sup>1</sup>, Cécile Robin<sup>2</sup>, Hervé Gillet<sup>1</sup>, Jean Borgomano<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*EPOC, Pessac*

<sup>2</sup>*Géosciences Rennes*

<sup>3</sup>*TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau*

Sediment instabilities commonly occur on carbonate slopes and constitute the major processes involved in their geometry and present-day morphology. The Bahamian archipelago represents an outstanding example of re-sedimented carbonate margin which enables to precisely build-up a detailed stratigraphic and geometric architecture. Core and logging data from ODP Leg 166 and newly acquired 2D High-Resolution multichannel seismic reflection from the first Leg of the CARAMBAR Cruise allowed a re-evaluation of the Neogene seismic stratigraphy and architecture of the windward slope of the western Great Bahama Bank (GBB).

The slope-to-basin Neogene deposits are controlled by two types of sedimentation : (1) the downslope gravity-driven carbonate deposits prograding westward and (2) bottom currents deposits progressively migrating northward along the margin. These two sedimentary systems are simultaneously active during Pliocene and interfinger at the toe-of-slope whilst the slope sedimentation, typified by turbidite aprons and slumps, prevails during the Miocene and the Pleistocene.

This work is centered on high-resolution seismic data and the refinement of carbonate depositional sequences. The seismic observations allow to highlight a broad variety of facies for each sequence which range from gravity-flow slope carbonates, pelagic ooze to contourite deposits. Seismic facies display rapid lateral along strike and downdip transitions ranging between 1 and 10 km. The depositional cycles are interpreted as resulting from the global sea-level variations whilst the drift currents come from a geodynamic re-organisation affecting the Central American Seaway. Indeed, the Panama Isthmus occurring during the Neogene which significantly modified the north Atlantic thermohaline circulation and amplified the Florida Current intensity and pathway.

### 2.4.14 (o) Découverte d'un complexe chenal-levées actuel sur une pente carbonatée

Thierry Mulder<sup>1</sup>, Emmanuelle Ducassou<sup>1</sup>, Hervé Gillet<sup>1</sup>, Vincent Hanquiez<sup>1</sup>, Mélanie Principaud<sup>1</sup>, Ludivine Chabaud<sup>1</sup>, Gregor Eberli<sup>2</sup>, Pascal Kindler<sup>3</sup>, Isabelle Billeaud<sup>4</sup>, Eliane Gonthier<sup>1</sup>, François Fournier<sup>5</sup>, Philippe Léonide<sup>5</sup>, Jean Borgomano<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*EPOC, Talence*

<sup>2</sup>*University of Miami, Division of Marine Geology and Geophysics, États-Unis*

<sup>3</sup>*University of Geneva, Section of Earth and Environmental Sciences, Suisse*

<sup>4</sup>*TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau*

<sup>5</sup>*CEREGE, Aix-en-Provence*

Les données de sismique-réflexion très haute résolution (sondeur de sédiments à modulation de fréquence CHIRP) recueillies lors de la mission Carambar le long de la pente occidentale du banc carbonaté de Gran Bahama (Ouest de l'île d'Andros, Bahamas) a révélé la présence du premier complexe chenal-levées actuel dans un système de dépôt strictement carbonaté. Le complexe le plus récent, à peine détectable dans la morphologie actuelle est situé sur la pente inférieure du bassin, entre 600 et 800 m de profondeur d'eau. Il s'est construit au-dessus

de deux autres complexes plus anciens séparés chacun par des surfaces d'érosion. Cette architecture suggère l'existence de processus gravitaires continus le long de la pente carbonatée et de processus de migration du complexe par avulsion. La morphologie et la géométrie du complexe rappellent celles décrites dans les complexes alimentés par des sources silicoclastiques, en particulier avec la forme en « aile d'avion », mais avec des dimensions générales beaucoup plus faibles (longueur : 9 km ; largeur : 4 km) et un chenal ne dépassant pas quelques mètres de profondeur. Le remplissage sédimentaire atteint 20 m. L'interprétation des profils sismiques montre que le système s'est construit en plusieurs phases mettant en jeu différents types de processus gravitaires incluant des courants de turbidité. Ce complexe, actuellement inactif, est fossilisé par des dépôts hémipélagiques ou par des dépôts issus des écoulements de faible énergie chenalisés par le réseau de ravines entaillant le haut de pente qui déposent des figures sédimentaires de types dunes asymétriques inverses assimilables à des antidunes. Ces dépôts récents montrent des indices de remaniement par les courants de fond, en particulier les courants liés aux ondes internes qui ont pu pirater le matériel apporté par les courants de turbidités, ce qui expliquerait l'asymétrie des levées. La découverte de ce complexe a des implications majeures pour la mise à jour des modèles conceptuels décrivant le fonctionnement des pentes carbonatées et leur exploration pétrolière. Elle a également un impact sur le cycle global du carbone, en transportant des carbonates de plate-forme vers les grands fonds, et sur la grande diversité des communautés benthiques vivant dans les environnements de pentes tropicales.

### 2.4.15 (o) Dynamique sédimentaire et morphologie de la pente nord de Little Bahama Bank (Bahamas) : réévaluation du modèle de tablier de base de pente carbonatée.

Elsa Tournadour<sup>1</sup>, Thierry Mulder<sup>1</sup>, Jean Borgomano<sup>2</sup>, Ludivine Chabaud<sup>1</sup>, Vincent Hanquiez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*EPOC, Pessac*

<sup>2</sup>*TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau*

La pente nord de Little Bahama Bank (LBB) a longtemps été considérée comme un exemple actuel de tablier de base de pente (base of slope apron), en opposition au modèle d'éventail sous-marin, du fait de l'absence d'organisation architecturale e.g., de développement de géométrie chenalisées, de levées ou de lobes de dépôt. Le nouveau jeu de données collecté lors de la mission Carambar a cependant permis la reconnaissance de plusieurs types d'éléments architecturaux sur la pente nord de LBB, et conduit à une réévaluation des précédents modèles. La pente nord de LBB s'organise selon trois grandes parties. (1) La bordure de la plate-forme est marquée par une forte pente et est caractérisée à la fois par du transit sédimentaire et du dépôt avec la formation d'une couverture sédimentaire. (2) Les pentes supérieure et moyenne, principalement composées de dépôt de boue de péri-plate-forme, sont incisées par 18 canyons à la morphologie complexe. Cette morphologie semble être contrôlée par des glissements intra-pente, l'érosion régressive, la diagenèse ainsi que l'action de courant de turbidité. (3) Les canyons s'ouvrent ensuite vers l'aval sur de petits sillons distributaires débouchant vers des zones de dépôt partiellement confinées. La pente inférieure est également marquée par l'action du courant des Antilles qui remobilise les sédiments dans la partie orientale et les dépose dans la partie occidentale, participant ainsi à la croissance du drift du LBB.

Le modèle de tablier de pente apparaît donc trop restrictif pour décrire la pente nord de LBB. En effet, les processus sur cette pente ne se limitent pas à la formation de débris de pied de pente issus de l'érosion intra-pente plus en amont. Les morphologies observées sont en réalité le résultat de l'action combinée du transfert de boue carbonatée, des courants de turbidité et des courants de fond. Ces processus

induisent la formation d'éléments architecturaux spécifiques aux pentes carbonatées bahamiennes.

#### 2.4.16 (o) Le système contouritique de Petit Banc des Bahamas : étude stratigraphique, sédimentologique et géophysique au cours des derniers 424 ka

Ludivine Chabaud<sup>1</sup>, Elsa Tournadour<sup>1</sup>, Emmanuelle Ducassou<sup>1</sup>, Thierry Mulder<sup>1</sup>, John Reijmer<sup>2</sup>, Gilles Conesa<sup>3</sup>, Jacques Giraudeau<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Pessac

<sup>2</sup>Sedimentology and Marine Geology group, VU University Amsterdam, Amsterdam, Pays-Bas

<sup>3</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

Les bancs des Bahamas représentent des environnements carbonatés actuels soumis à de faibles apports terrigènes silicoclastiques. La sédimentation carbonatée des bancs des Bahamas est principalement contrôlée par les variations du niveau marin relatif et la production biogénique, sans influence majeure de la tectonique régionale. Cette étude vise à comprendre les processus sédimentaires agissant au niveau de la pente septentrionale du Petit Banc des Bahamas à partir de données sédimentaires, bathymétriques et sismiques (CHIRP) issues de la mission CARMBAR (2010).

Les données sismiques et bathymétriques mettent en évidence la forme hémiconique et les structures internes du LBB drift ainsi que la sédimentation asymétrique autour des monts carbonatés. L'analyse des carottes sédimentaires nous a permis de déterminer les sources sédimentaires (nature et origine des particules) et de créer un modèle stratigraphique à haute résolution basé sur les assemblages de foraminifères planctoniques et de coccolithophores, et sur les mesures radiocarbone et d'isotopes stables de l'oxygène sur les tests de foraminifères planctoniques.

Le modèle stratigraphique permet de considérer les variations climatiques du stade isotopique marin 11 à l'actuel. Pendant les périodes interglaciaires et de haut niveau marin, les apports carbonatés depuis la plate-forme sont importants et les dépôts de pente sont très développés avec de forts taux de sédimentation. Des apports argileux via les courants marins perturbent la sédimentation carbonatée pendant la transgression marine au début des périodes interglaciaires. Les périodes glaciaires correspondent elles à des bas niveaux marin et donc à des périodes où la plate-forme est exondée. Peu de sédiments carbonatés sont alors produits et exportés depuis le haut de pente et la sédimentation pélagique domine. Les dépôts glaciaires sont réduits, plus grossiers et présentent une séquence à granoclassement inverse suivi par une séquence à granoclassement normal interprétés comme des dépôts contouritiques. Les tests des foraminifères planctoniques et les coquilles de ptéropodes sont partiellement phosphatisés. Le courant des Antilles et la diagénèse précoce ont une influence prépondérante sur la nature de ces dépôts.

#### 2.4.17 (o) Impact des événements climatiques sur les espèces profondes : quelle réponse des coraux froids aux épisodes de cascades d'eaux denses ?

Franck Lartaud<sup>1</sup>, Erwan Peru<sup>1</sup>, Nadine Le Bris<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LECOB, Banyuls-sur-mer

Les récifs coralliens profonds sont des habitats essentiels des écosystèmes profonds. En effet, les coraux froids sont des espèces ingénieuses qui forment des récifs servant de nurseries et de zone de protection, de reproduction et de nutrition pour de nombreuses espèces, dont certaines

ont un intérêt patrimonial et commercial. Outre l'impact sur la biodiversité, ces récifs sont également d'excellentes archives climatiques (via l'analyse géochimique de leur squelette) et des puits de carbone (stockage durable de CO<sub>2</sub> par la formation d'un squelette carbonaté). Ces habitats spécifiques sont dépendants de l'exportation de matière organique du plateau continental vers les environnements profonds. Particulièrement en Méditerranée, dans les canyons sous-marins du Golfe du Lion, où des événements météorologiques saisonniers conduisent à la formation de phénomènes pulsés de plongées d'eaux denses. Mais les effets directs et indirects du « cascading » sur les récifs de coraux froids sont encore mal connus. Si les fortes charges particulières constituent un apport d'énergie, les violents courants associés à ces phénomènes sont une perturbation majeure du fonctionnement de l'écosystème.

Il est donc primordial d'étudier la réponse des coraux profonds à ces événements de cascading afin (1) de mieux évaluer la résilience des récifs actuels face à la variabilité de leur environnement, notamment en Méditerranée où l'amplitude et la fréquence des épisodes de cascading sont susceptibles d'évoluer dans un futur proche, et (2) de déterminer la dynamique de croissance des récifs fossiles, en lien avec les changements climatiques passés.

Le développement de techniques de marquage-recapture, couplé à des analyses sclérochronologiques, permet l'étude de la croissance à l'échelle du polype, alors que des unités de transplantation de boutures de coraux permet le suivi de croissance à l'échelle de la colonie (Lartaud et al., 2013, 2014). Des expériences de croissance in situ dans le canyon Lacaze-Duthiers (entre 340 et 520m de profondeur) sur deux espèces ingénieuses (*Lophelia pertusa* et *Madrepora oculata*), montrent à la fois une réponse saisonnière bien marquée et une influence de la bathymétrie pour *M. oculata*. De plus, les deux espèces présentent une forte variabilité de croissance inter-annuelle, répondant à des conditions distinctes de cascading.

#### 2.4.18 (o) Caractérisation des crues dans les sédiments du prodelta du Rhône

Margot Joumes<sup>1</sup>, Thierry Mulder<sup>1</sup>, Maria-Angela Bassetti<sup>2</sup>, Serge Berné<sup>2</sup>, Philippe Martinez<sup>1</sup>, Jean-Luc Schneider<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Talence

<sup>2</sup>CEFREM, Perpignan

Les données sur deux carottes « jumelles » (RHSKS57 et RHSKS58) recueillies lors de la mission RHOSOS à 70 mètres de profondeur d'eau ont permis de corréler des lits sédimentaires spécifiques reliés à des crues historiques du Rhône (1671AD - 1986 AD) grâce aux isotopes du (137Cs ; 206Pb/207Pb) et à des pics d'espèces d'ostracodes continentaux. L'interprétation des données de radioisotopes à courte demi-vie (210Pb<sub>xs</sub>), des mesures granulométriques à un pas d'échantillonnage très serré, des mesures d'éléments géochimiques majeurs en fluorescence X ainsi qu'à l'analyse de lames minces ont permis de caractériser finement ces niveaux de crue. Quelques mesures de carbone organique et de  $\delta^{13}C$  ont également été effectuées.

Les crues majeures se caractérisent par des variations granulométriques qui peuvent soit montrer une séquence hyperpycnale classique (granoclassement inverse puis normal) ou une séquence turbiditique (granoclassement normal). Dans tous les cas, la crue se caractérise par une arrivée massive de grain de quartz et un enrichissement en matière organique qui résulte d'un apport de débris végétaux. Les séquences hyperpycnales typiques ont pu être corrélées avec l'évolution des débits journaliers pour les crues déclenchées entre 1990 et 1999. Les rapports en éléments géochimiques détritiques augmentent également au moment des crues tandis que le  $\delta^{13}C$  diminue appuyant l'hypothèse d'un apport continental conséquent. L'observation d'une lame mince a permis de mettre en évidence un granoclassement normal pouvant alors être interprété comme la présence d'une turbidite. Cette dernière pourrait résulter soit de la transformation d'une séquence hyperpycnale tronquée à sa

base par érosion ou non-préservation des sédiments lors de l'augmentation progressive des débits au cours de la crue mais préservation du phénomène de diminution des débits, soit de petites bouffées turbides liées à la progradation de barres d'embouchures soit à la transformation d'une masse glissée. La turbidite observée pourrait également refléter la présence d'une tempestite bien que la profondeur à laquelle a été prélevé le sédiment semble proche de la limite d'action des vagues de tempêtes dans le delta du Rhône. De plus, des lits enrichis en particules argileuses ont été observés, ces derniers pourraient être corrélés à des crues de faible magnitude et traduiraient la formation puis la décantation d'un panache hypopycnal.

### 2.4.19 (p) Mise en évidence de structures et dépôts contouritiques sur le Plateau de Demerara (Guyane française, Surinam) : Implications océanographiques et sédimentaires

Cedric Talloire<sup>1,2</sup>, Maria-Angela Bassetti<sup>1</sup>, Pierre Giresse<sup>1</sup>, Lies Loncke<sup>1</sup>, Germain Bayon<sup>2</sup>, Mirjam Randla<sup>1</sup>, Roselyne Buscaïl<sup>1</sup>, François Bourrin<sup>1</sup>, Xavier Durrieu De Madron<sup>1</sup>, Stéphane Kunesch<sup>1</sup>, Christine Sotin<sup>1</sup>, Marc Vanhaesebroucke<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEFREM, Perpignan

<sup>2</sup>IFREMER, Plouzané

La campagne océanographique IGUANES a eu lieu en mai 2013 sur le Plateau de Demerara dans le cadre d'un partenariat entre le CEFREM et l'IFREMER. L'un des objectifs de cette mission était d'appréhender les processus sédimentaires affectant la marge guyanaise peu connus jusqu'à maintenant. Ce plateau forme un promontoire de 380 km de long, 220 km de large, et montre une profondeur comprise entre 1000 et 4500 m. Il se délimite au Nord par une marge transformante passive caractérisée par une forte pente. Cette partie du plateau de Demerara est affectée par des phénomènes d'instabilité de pente. Lors de la campagne, 20 carottes sédimentaires ont été prélevées sur le plateau. Elles sont composées à leur sommet d'un niveau sableux à argileux ocre riche en foraminifères. Sous ces niveaux, la sédimentation est silto-sableuse, de teinte grise à vert olive avec des séquences plus grossières, riches en foraminifères et en glauconie. La glauconie est liée à une diagenèse à l'interface eau-sédiment et implique un faible taux de sédimentation. Le vannage exercé par un courant de fond peut agir sur le taux de sédimentation et favoriser la formation et la maturation de la glauconie.

Les données sismiques acquises durant IGUANES montrent, en outre, la présence de plusieurs structures sédimentaires : sediment waves et queues de comète d'orientation NO/SE. Ces structures peuvent être liées à l'action de courants profonds le long de la pente. Les mesures de courant sur le plateau de Demerara indiquent une vitesse moyenne de 9.5cm/s avec des pointes à 32.5cm/s et une orientation NO/SE. Ces données sont en accord avec nos observations.

L'ensemble de ces arguments démontre l'activité du prolongement méridional du North Atlantic Deep Current qui est à l'origine des dépôts contouritiques le long du Plateau de Demerara. On suppose que ce courant est actif depuis plusieurs dizaines de milliers d'années. Les travaux à venir auront pour but de comprendre les liens entre les dépôts de contourites, sorties de fluides et l'instabilité de pente dans cette région.

### 2.4.20 (p) Enregistrement de la mise en place et de l'évolution de la branche supérieure de la Mediterranean Outflow Water dans le drift contouritique de Faro (Golfe de Cadix)

Emmanuelle Ducassou<sup>1</sup>, Johanna Lofi<sup>2</sup>, Trevor Williams<sup>3</sup>, Roger Flood<sup>4</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Talence

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier

<sup>3</sup>Borehole Research Group, Lamont-Doherty Earth Observatory, New York - États-Unis

<sup>4</sup>School of Marine and Atmospheric Sciences, Stony Brook University, États-Unis

Le drift contouritique de Faro est l'un des drifts les plus importants et les plus emblématiques du système de dépôt contouritique du Golfe de Cadix. Il s'est construit sous l'influence de la branche supérieure de la Mediterranean Outflow Water (MOW). Les deux sites de forage IODP de l'Expédition 339, U1386 et U1387, distants de 4 km, ont traversé et enregistré la séquence de dépôt contouritique du drift de Faro dans son intégralité sur plus de 400 m d'épaisseur. Ces deux séquences offrent une opportunité unique de comprendre la mise en place de la MOW et l'évolution de sa branche supérieure depuis le Pliocène.

Les caractéristiques sédimentologiques des dépôts contouritiques au Plio-Pleistocène sont contrôlées par une interaction complexe entre l'activité néo-tectonique locale, la topographie des fonds, les apports sédimentaires, les écoulements gravitaires et les changements dans l'écoulement du courant de fond et le transport sédimentaire. Les deux facteurs majeurs contrôlant ces systèmes de dépôts contouritiques sont les changements abrupts du climat et du niveau marin au cours des cycles glaciaires/interglaciaires. Ce travail présente les résultats préliminaires d'une analyse sédimentologique et de faciès détaillée de la séquence contouritique entière du drift de Faro, basée essentiellement sur des analyses granulométriques et des données de puits. Différents aspects des résultats granulométriques sont utilisés, comme l'évolution de la médiane granulométrique, le sortable silt ou une étude de l'évolution des modes au cours du temps. Ces résultats visent à établir des modèles détaillés de faciès et de dépôt des contourites sur une longue période de temps et évaluer la magnitude des facteurs de contrôle.

### 2.4.21 (p) Origine et stratigraphie des coulées de débris plio-pleistocènes de la marge de l'Algarve (expédition IODP 339, site U1386)

Lea Fournier<sup>1</sup>, Emmanuelle Ducassou<sup>1</sup>, Francisco J. Sierro<sup>2</sup>, José Abel Flores<sup>2</sup>, Cristina Roque<sup>3</sup>, Carlos Alvarez-Zarikian<sup>4</sup>, Johanna Lofi<sup>5</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Talence

<sup>2</sup>Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Salamanca, Espagne

<sup>3</sup>Instituto de Investigação do Mar e da Atmosfera, Lisboa, Portugal

<sup>4</sup>Integrated Ocean Drilling Program (Texas A&M University), États-Unis

<sup>5</sup>Géosciences Montpellier

Les dépôts contouritiques du drift de Faro sur la marge nord du golfe de Cadix ont été forés lors de l'Expédition IODP 339 (novembre 2011-janvier 2012) notamment dans le site U1386. La base de ces dépôts contouritiques se caractérise par deux périodes dominées par des dépôts gravitaires d'âge et de composition différentes. Parmi ces dépôts gravitaires, plusieurs dépôts issus de coulées de débris relativement épaisses

(de 12 à 5 m) sont observés et ont été étudiés en détail.

L'écoulement des débrites étant non turbulent, outre des méthodes d'étude sédimentologique, des analyses micropaléontologiques détaillées ont pu être menées. Ainsi, les foraminifères planctoniques ont permis d'établir une biostratigraphie détaillée de ces dépôts et les foraminifères benthiques ont été utilisés dans la reconstruction des paléoprofondeurs d'origine des sédiments incorporés dans les débrites. Ces débrites sont datées du Pliocène inférieur et du Pléistocène inférieur et se sont déposées en domaine mésobathyal. Elles sont caractérisées par une matrice sableuse, bioclastique pour celle du Pliocène inférieur et terrigène pour celle du Pléistocène inférieur, et des clastes silto-argileux. L'étude des foraminifères benthiques a également montré que ces débrites ont parcouru moins de 100 km en érodant le fond marin depuis la zone de rupture jusqu'à la zone de dépôt. Les matrices de chacune de ces débrites proviennent du plateau continental, tandis que les clastes ont été arrachés entre le plateau et le domaine mésobathyal.

L'abondance des faunes néritiques au Pliocène inférieur et des apports terrigènes fluviaux au Pléistocène inférieur sur les marges ibériques sont des facteurs qui ont favorisés les écoulements gravitaires depuis le plateau continental vers la pente. L'activité tectonique et diapirique, particulièrement importante au cours de ces deux périodes sur la marge de l'Algarve, ont pu être les paramètres déclenchants des déstabilisations à l'origine des débrites.

#### 2.4.22 (p) Contrôle eustatique de l'évolution des canyons sous-marins dans le Golfe du Lion (Méditerranée NW)

Mohamed Miradji<sup>1</sup>, Serge Berné<sup>1</sup>, Marie-Aline Mauffrey<sup>1</sup>, Morgan Peix<sup>2</sup>, Gwenaél Jouet<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CEFREM, Perpignan

<sup>2</sup>IOTA survey, Mauguio, France

<sup>3</sup>IFREMER, Plouzané

La morphologie actuelle du Golfe du Lion présente, sur la pente continentale, un réseau complexe de canyons sous-marins. Quelle est l'origine de ces canyons et à quand remonte leur formation ? Sont-ils l'héritage de la crise de salinité messinienne, qui a vu, au niveau de la plate-forme actuelle du Golfe du Lion, la formation d'un important réseau de drainage sub-aérien ? Pour répondre à ces questions, nous nous sommes appuyés sur une base de données sismiques importante, et sur le forage Promess 1 PRGL1-4 qui fournit une chronologie détaillée des événements climato-eustatiques durant les 500.000 dernières années, et des surfaces repères que l'on peut « propager » plus ou moins facilement à l'échelle de toute la marge.

(1) Les canyons sont des structures d'érosion et de transit sédimentaire, mais ils représentent aussi des dépôt-centres importants, en particulier sur les marges deltaïques et progradantes (comme le Golfe du Lion), caractérisées par un flux sédimentaire et une subsidence importants. Ce résultat est illustré par une migration de 1 à 10 km/500 ka du « rebord de plate-forme » au niveau de la tête des canyons.

(2) Les canyons quaternaires, à l'exception du canyon du Petit Rhône, ne sont en aucune manière l'héritage des canyons messiniens. D'une part, ils n'occupent pas la même position, d'autre part aucun canyon majeur ne semble avoir fonctionné durant le Pliocène inférieur et moyen.

(3) Les cycles glacio-eustatiques de 100.000 ans fournissent le rythme des cycles de creusement-remplissage (C/R) observés. Dans le détail, toute variation eustatique notable (supérieure à environ 70 m) est susceptible d'initier un cycle C/R, en particulier entre le stade isotopique 8 et le stade isotopique 6, où 3 cycles C/R sont ainsi identifiés.

#### 2.4.23 (p) Contrôle de l'activité turbiditique dans le bassin profond du Gange-Brahmapoutre au cours des derniers 200 000 ans

Kelly Fauquembergue<sup>1</sup>, Lea Fournier<sup>1</sup>, Sébastien Zaragosi<sup>1</sup>, Franck Bassinot<sup>2</sup>, Catherine Kissel<sup>2</sup>, Thibault De Garidel-Thoron<sup>3</sup>, Philippe Martinez<sup>1</sup>, Eva Moreno<sup>4</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Talence

<sup>2</sup>LSCE, Gif-sur-Yvette

<sup>3</sup>CEREGE, Aix en Provence

<sup>4</sup>MNHN, Paris

Le plus grand système turbiditique du Monde se situe dans la Baie du Bengale. Les sédiments qui l'alimentent au Nord sont issus des fleuves Ganges et Brahmapoutre, qui drainent les plus hauts massifs himalayens. Les transferts sédimentaires se font principalement sous forme de courants de turbidité, dont la fréquence augmente lors des grands épisodes de mousson (Goodbred et Kuehl, 2000). Les études antérieures ont montré qu'en haut niveau marin, les sédiments se stockent sur le delta du Ganges-Brahmapoutre, et seul le chenal principal reste actif (Curry et al., 2003).

En 2012, la mission MONOPOL s'est intéressée aux décharges sédimentaires qui empruntent ces chenaux. Des carottages ont été réalisés sur la levée active au bord du chenal principal (MD12-3417), et sur la levée d'un chenal actuellement inactif (MD12-3412). La MD12-3412 couvre un enregistrement sédimentaire de 200 000 ans, tandis que la MD12-3417 couvre les derniers 10 000 ans. Cette différence de résolution a permis d'étudier les variations de sédimentation turbiditique à différentes échelles de temps. Afin de connaître l'évolution des décharges sédimentaires, une étude de fréquences et d'épaisseurs des séquences turbiditiques a été menée.

Sur le bord du chenal principal, seul l'Holocène inférieur (-10 000 à 7 000 ans) présente une activité turbiditique intense. Cette période est caractérisée par une intensification des moussons asiatiques (Goodbred et Kuehl, 2000), celles-ci semblent donc liées à l'activité turbiditique à l'échelle du millier d'années.

Sur le site de la MD12-3412, l'alimentation du chenal se fait uniquement lors des stades isotopiques 2, 4 et 6. A cette échelle, l'activité turbiditique semble conditionnée par les variations du niveau marin. Une baisse du niveau marin pourrait entraîner un déplacement vers le rebord de pente des édifices deltaïques, permettant ainsi une alimentation plus linéaire de la marge.

#### 2.4.24 (p) Contrôle structural de l'architecture moderne du système turbiditique du Ruvuma-Rufiji (marge est-africaine)

Lea Fournier<sup>1</sup>, Sébastien Zaragosi<sup>1</sup>, Julien Bourget<sup>2</sup>, Laurine San Pedro<sup>3</sup>, François Leparmentier<sup>4</sup>, Thierry Garlan<sup>5</sup>, Yann Le Faou<sup>5</sup>, Frédérique Eynaud<sup>1</sup>, Pierre Rachel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Talence

<sup>2</sup>School of Earth and Environment, Perth, Australie

<sup>3</sup>IUEM, Plouzané

<sup>4</sup>TOTAL, Paris-La Défense

<sup>5</sup>SHOM, Brest

La découverte d'une vallée sous-marine géante située au large de la Tanzanie (Bourget et al., 2008) a relancé l'étude d'une marge jusqu'à présent très peu étudiée : la marge est-africaine. Cette vallée correspond à la partie médiane d'un système turbiditique actuel de plus de 1 200 km de long. Il est l'un des principaux systèmes turbiditiques de la marge est-africaine et fait partie des plus grands systèmes marins profonds

cartographiés à ce jour. Nous avons pu le décrire pour la première fois dans son intégralité en combinant les données acquises lors des missions océanographiques Fanindien (2006) et Tanzaval (2010) avec des valorisations de transit du SHOM (service hydrographique et océanographique de la marine) et de la sismique pétrolière.

Ce système est connecté en amont aux principaux fleuves de la Tanzanie et du Mozambique tel que le Ruvuma et le Rufiji, ce qui explique la dénomination proposée de « système turbiditique du Ruvuma-Rufiji ». Il s'agit d'un système à alimentation multiple connecté à un bassin intrapente (le bassin de Makonde) puis à un chenal principal dont les écoulements sédimentaires se déposent dans la plaine abyssale de Somalie sous forme de lobes sableux dont l'extension dépasse les 40 000 km<sup>2</sup>.

La tectonique joue un rôle majeur dans la structuration de la marge est-africaine ainsi que sur l'architecture du système. La présence de la ride de Davie et des grabens des Kerimbas et de Makonde permet ainsi d'expliquer la localisation, les dimensions ainsi que les caractéristiques morphologiques très singulières du système turbiditique du Ruvuma-Rufiji.

#### 2.4.25 (p) Oligocene to Lower Pliocene turbidite deposits of the Inner Kwanza basin, Angola : Stratigraphic architecture and sedimentary processes

Michel Lopez<sup>1</sup>, Cirilo Cauceiro<sup>2</sup>, Christian Seyve<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier

<sup>2</sup>Universidade Agostinho Neto Luanda, Angola

<sup>3</sup>TOTAL EP ANGOLA, Luanda, Angola

During the Cenozoic time, the eastern part of the Kwanza basin was submitted to an overall uplift that led to the continentalization of the domain and the outcropping of slope to deep sea deposits along well exposed coastal cliffs. This so called Inner Kwanza basin represents an exceptional area to calibrate and accurate the sedimentary architecture of the time-equivalent turbidite complexes imaged on seismic and drillholes from the deep offshore. In particular, in the central domain, the series is slightly tilted toward the north showing an overall shallowing upward sequence from Oligocene lower slope to Pliocene shelf deposits. On this area, the turbidite deposits display two main stratigraphic architectures clearly linked to the geodynamic of the margin. In the South from Cabo do Sao Braz to Cabo Ledo, the Oligocene to Lower Miocene series corresponds to a lower slope channel-levee network clearly controlled by the growth of diapirs. Constructional and erosional systems are both visible with typical facies assemblages, including mass-transported deposits linked to the destabilization of the flanks of the diapirs. In the northern zone, from Sangano to Barra do Cuanza the Upper Miocene to Pliocene turbidite sequence develops on wide troughs, entrenched into the mixed carbonate-siliciclastic shelf and linked to raft tectonics above the decollement of salt during the up-lift and tilting of the margin. On this trough, meandering channel-levee systems show both a clear compensation pattern and a partial entrenchment into previous levee deposits. Channels are several hundred meters wide and 30 to 50 meters thick; they display both an overall fining upward sequence and a lateral facies partitioning from axial mass-transported deposits to cross-bedded coarse sand and parallel laminated to rippled fine sand in the margins. Channel margins show a peculiar bioclastic sandstone facies intensely burrowed by Thalassinoides and Ophiomorpha, which indicate carbonate sand cascading from the shelf edge and partial colonization by conveyed resistant fauna.

#### 2.4.26 (p) Turbidites hyperpyncnales dans le système turbiditique du Rhône ?

Swesslath Lombo Tombo<sup>1</sup>, Serge Berné<sup>1</sup>, Bernard Dennielou<sup>2</sup>, Maria-Angela Bassetti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEFREM, Perpignan

<sup>2</sup>IFREMER, Plouzané

Le transfert des sédiments rhodaniens vers le système turbiditique du Rhône était maximum pendant les périodes de bas niveau marin car il était favorisé par la proximité du débouché du fleuve et de la tête de canyon du Petit-Rhône. Au cours de ce transfert, il n'a pas encore été montré que le Rhône pourrait avoir des concentrations d'élément en suspension suffisant pour créer des courants hyperpyncnaux. Afin de caractériser ce transfert sédimentaire dans le temps et dans l'espace, une étude haute résolution a été réalisée sur des carottes prélevées le long du système.

Nos résultats permettent de tirer les conclusions suivantes :

1) l'enregistrement turbiditique est caractérisé par des lamines silteuses, des dépôts de silt à sable fin épais, majoritairement à granoclassement normal, et d'épaisseur allant du millimètre à 28 cm ; 2) la répartition spatiale des lithofaciès turbiditiques est contrôlée par la distance par rapport à l'axe du chenal et le degré de confinement, 3) l'activité turbiditique cesse dans le système autour de 18.000 ans cal BP illustrant le contrôle eustatique, 4) certaines turbidites épaisses montrent un granoclassement inverse à leur base qui peut être interprété comme un signal hyperpyncnal, 5) Ces turbidites hyperpyncnales se sont déposées préférentiellement entre 20.000 et 19.000 ans cal BP, lors du maximum de bas niveau marin.

La conjonction du bas niveau marin au dernier maximum glaciaires et de fortes décharges fluviales, probablement saisonnières, à fortes charges sédimentaires liées à l'ablation des glaciers alpins, a probablement été la condition permettant la genèse de courants hyperpyncnaux et leur transformation en courants de turbidité dans le canyon du Petit-Rhône jusque dans la vallée turbiditique. Ces turbidites hyperpyncnales sont mises en évidence pour la première fois dans le STR sur la base des analyses granulométriques.

#### 2.4.27 (p) Comparaison des données bathymétriques de la partie amont du canyon de Capbreton (entre 1998 et 2013)

Antoine Roussey<sup>1</sup>, Hervé Gillet<sup>1</sup>, Alaïs Mazières<sup>1,2</sup>, Thierry Garlan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Talence

<sup>2</sup>SHOM, Brest

Le canyon de Capbreton se caractérise par un thalweg méandrique une très profonde incision du plateau continental (tête à moins de 250m du rivage)(Cirac et al., 2001) et son activité turbiditique moderne (Gaudin et al., 2006 ; Mulder et al., 2001). Il est dominé par deux types de courants : (1) les courants associés aux ondes internes qui transportent alternativement les particules fines vers l'amont ou vers l'aval, (2) les courants de turbidité qui épisodiquement vont évacuer les particules vers l'environnement profond (Mulder et al., 2009).

Si les processus gravitaires au sein du corps du canyon sont bien connus, le mode de fonctionnement de la tête et de la partie supérieur du canyon reste flou et très peu documenté.

Notre étude s'appuie sur la comparaison de plusieurs jeux de données bathymétriques multifaisceaux acquis respectivement sur cette zone en 1998, 2010, 2012 et 2013.

Les résultats préliminaires montrent une évolution morphologique marquée de la partie amont du canyon (thalweg et terrasses). En effet, la bathymétrie montre une incision du thalweg et la mise en place de terrasses dites « basses ». L'incision longitudinale du canyon est marqué par des knick point tout au long de la partie amont du canyon.

Le prélèvement d'une carotte sédimentaire sur l'une des terrasses montre un événement de turbidité unique bouleversant le profil d'équilibre du canyon. Seul quelques événements postérieurs à la turbidite majeures furent observés et compensés par l'érosion dans le thalweg.

Les processus qui contrôlent la sédimentation dans la partie amont du canyon montrent deux processus différents : (1) un cycle dépôt puis surcreusement, et (2) des événements secondaires marquant une légère aggradation des terrasses.

#### 2.4.28 (p) Analyse morphobathymétrique HR et évolution de la tête du canyon de Capbreton sur la période 1998-2013

Hervé Gillet<sup>1</sup>, Alaïs Mazières<sup>1</sup>, Thierry Garlan<sup>2</sup>, Thierry Mulder<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Talence

<sup>2</sup>SHOM, Brest

Le canyon de Capbreton prend naissance à moins de 250m du rivage. Il est actuellement déconnecté du fleuve Adour, mais reste néanmoins actif.

Mazières et al. (2014) ont démontré que la tête du canyon fonctionne comme une zone de stockage temporaire qui reçoit par conditions de houles fortes les sables de la dérive littorale aquitaine avant de les évacuer vers l'aval dans le canyon. Si ce processus d'alimentation est maintenant bien compris, la façon dont les sédiments sont évacués vers le canyon reste floue. Plusieurs indices, dont des traces de déstabilisations sableuses dans la tête, tendent à montrer que ces zones jouent un rôle important dans le déclenchement de courants gravitaires au sein du canyon. Cependant, aucune activité actuelle ou récente dans cette partie canyon (entre 10 et 100 m de profondeur) n'avait été jusqu'à présent mise en évidence.

Notre étude s'appuie sur la comparaison de plusieurs jeux de données bathymétriques multifaisceaux acquis respectivement sur cette zone en 1998, 2001, 2010, 2012 et 2013.

Le fond de la tête du canyon est caractérisée par la présence (1) de chenaux convergents vers le corps du canyon, (2) de knick points et (3) de bedforms transversales dont la longueur d'onde augmente vers l'aval. Sur la période étudiée, le fond de la tête du canyon a été considérablement remanié par de nombreux cycles érosion et comblement. La forme et la position générales de la tête restent cependant stables et le fond semble osciller autour d'une position d'équilibre. Le fond de la tête est remanié par des processus d'érosion régressive faisant migrer les knick points vers l'amont.

La présence de cicatrices de glissement dans la tête du canyon, processus de transferts de sédiments jusque-là privilégié, n'est pas avérée. Les bedforms transversales apparaissent quant à elles comme une probable signature de ce processus de transferts mais leur origine, comme dans le canyon de Monterey, reste sujet à débat.

#### 2.4.29 (p) La cicatrice de glissement(s) de Capbreton : analyse morphobathymétrique HR, processus et origine (Apport des données de la mission SARGASS)

Guillaume Rapinat<sup>1</sup>, Hervé Gillet<sup>1</sup>, Michel Cremer<sup>1</sup>, Vincent Hanquiez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Talence

<sup>2</sup>EPOC, Pessac

La cicatrice de glissement de Capbreton se situe aux abords du canyon de Capbreton, sur le rebord du plateau marginal landais. Des études réalisées sur cette zone entre 2006 et 2008, utilisant des données des missions ITSAS et PROSECAN, ont permis d'en décrire les grands traits morphologiques et de l'interpréter comme une cicatrice associée à un glissement polyphasé.

De nouvelles données de bathymétrie multifaisceaux, sismiques HR,

Sparker, CHIRP, PENFELD ainsi que des carottes Kullenberg ont été acquises lors de la mission SARGASS de 2010. Cette étude a pour objectif de préciser les processus mis en jeu dans la formation de cette structure.

L'analyse de ces données montre qu'il existe un contraste morphologique marqué entre les flancs est et ouest de la cicatrice. La présence de ravines sur la bordure orientale est interprétée comme issue de transfert sédimentaire du plateau vers le domaine profond. Le flanc ouest est caractérisé par une structure en terrasse qui aurait pour origine différentes phases de glissement. Les données Sparker et HR montrent plusieurs unités de faciès chaotiques à transparents corrélées aux structures lobées vues sur la bathymétrie, nous permettant de les définir comme des masses glissées. La superposition de certaines de ces masses glissées confirme que ce glissement serait de type polyphasé. L'analyse de la structure interne des terrasses observées sur la bordure occidentale de la dépression montre que les glissements successifs seraient de type translationnel-rétrogressif. Les dernières masses glissées ont été datées à environ 55 000 ans grâce à une corrélation entre le taux de sédimentation moyen observé sur la carotte KS10b et l'épaisseur de dépôt hémipélagique les recouvrant.

La sismique HR révèle la présence de plusieurs niveaux de décollement sous les différentes masses glissées. En revanche aucune structure profonde particulière n'a été identifiée sous cette dépression (ni faille, ni remontée de fluides). Des réflecteurs profonds soulignent d'anciennes grandes dunes sédimentaires, mais leur relation avec les glissements sus-jacents n'est pas établie.

#### 2.4.30 (p) Fonctionnement sédimentaire des ravines de la pente occidentale du grand banc des Bahamas

Emmanuelle Ducassou<sup>1</sup>, Mélanie Principaud<sup>1</sup>, Ludivine Chabaud<sup>1</sup>, Vincent Hanquiez<sup>1</sup>, Thierry Mulder<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Talence

Les plates-formes et les pentes des Bahamas se situent sur une marge passive, rendant l'influence de la tectonique moins importante que les changements du niveau marin relatif et la production biogénique. De plus, l'archipel est isolé des apports silicoclastiques terrigènes. La marge protégée (leeward) du Grand Banc des Bahamas (GBB), n'est donc soumise qu'aux apports sédimentaires depuis la plate-forme et à la production dans la colonne d'eau. La pente inférieure occidentale du GBB se caractérise par des corps sédimentaires localisés, situés entre 180 m et 600 m de profondeur. Certains de ces corps sont entaillés de ravines de faible profondeur.

Trois carottes sédimentaires ainsi que des données bathymétriques et sismiques très haute résolution (3,5 kHz) collectées pendant la mission océanographique CARAMBAR (2010) au large du GBB, ont été analysées et ont permis de mieux documenter les caractéristiques de ces corps sédimentaires de pente et de ces ravines. Les analyses sédimentologiques menées incluent une description détaillée des carottes, des mesures granulométriques et spectrophotométriques, de l'imagerie rX, des mesures XRF et de diffractométrie X. L'étude stratigraphique des carottes s'est basée sur les assemblages des foraminifères planctoniques et une dizaine d'âges radiocarbones.

Les premiers résultats montrent que le grand corps sédimentaire observé au sud de Bimini est entaillé de nombreuses ravines entre ~440 m et ~600 m de profondeur. Les trois carottes prélevées entre certaines de ces ravines montrent une alternance de dépôts type mudstone (boue aragonitique) et de type wackestone (partiellement lithifié) datant de la dernière période glaciaire. Cette alternance de faciès atteste que les écoulements provenant du banc et empruntant les ravines n'ont pas été continus dans le temps au cours des derniers 50 ka. Ces écoulements

pourraient être corrélés à des processus de density cascading saisonniers.

#### 2.4.31 (p) Signature stratigraphique d'une remontée pulsée du niveau marin au début de la dernière déglaciation (bordure de plateforme, Golfe du Lion, Méditerranée Ouest)

Juliette Baumann<sup>1</sup>, Marie-Aline Mauffrey<sup>1</sup>, Serge Berné<sup>1</sup>, Gwenael Jouet<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CEFREEM, Perpignan

<sup>2</sup>Géosciences Marines, Plouzané

L'étude de la croissance des coraux, de l'enregistrement sédimentaire sur les plates-formes continentales ou de la chronologie de la fonte des glaces dans les deux hémisphères à partir du Dernier Maximum Glaciaire (DMG) montre la possibilité d'un événement de décharge massive d'eaux de fonte autour de 19.000 BP (ou 19 ka mwp ; Clark et al., Science, 304, 2004) associé à un collapse majeur des calottes glaciaires dans l'hémisphère Nord. Cet événement reste encore discuté faute de données suffisantes.

L'observation des architectures sédimentaires (basée sur une importante base de données sismiques -Chirp-Sparker- et sédimentaire) du dernier prisme transgressif en bordure de plateforme dans le Golfe du Lion (Méditerranée occidentale) nous conduit à proposer l'existence d'une telle pulsation. Au niveau des bordures d'interfluves, les faciès de shoreface inférieur montrent 2 paraséquences aggradantes séparées par une surface d'érosion (de géométrie très similaire à la limite de séquence du DMG). Cette surface est datée entre 18.729 et 19.450 ka cal BP sur la carotte MD99-2348 (Sierro et al., QSR, 28, 2009). Au sommet du prisme sableux (shoreface supérieur), un motif similaire est également visible dans la partie orientale de notre zone d'étude. Même si on ne peut exclure un processus autocyclique, nous interprétons l'architecture des dépôts comme 2 phases de progradation/aggradation (au sens de Neal et Abreu, Geology 37, 2009), séparées par une surface d'érosion liée à une phase de ralentissement de la vitesse de remontée eustatique. Ce ralentissement a lieu entre les phases de remontée rapide liées au 19 ka mwp et au mwp-1a.

Cette première élévation tardi-glaciaire du niveau marin pourrait correspondre à un événement majeur dans le transfert des sédiments vers les bassins profonds et participe ainsi à la déconnexion, en rebord de plateau, des rivières avec les têtes de canyons et les systèmes turbiditiques associés.

#### 2.4.32 (p) The temporal and spatial variability of the ichnocoenoses distribution in the Gulf of Cadiz; effects of the Mediterranean Outflow Water

Rim Hassan<sup>1</sup>, Emmanuelle Ducassou<sup>1</sup>, Eliane Gonthier<sup>1</sup>, Thierry Mulder<sup>1</sup>, Jean Gerard<sup>2</sup>, Vincent Hanquiez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Pessac

<sup>2</sup>Deepwater Clastic Advisor REPSOL, Madrid, Espagne

The variations in abundance and diversity of the ichnocoenoses within the cores collected in the Gulf of Cadiz show relationships with climatically-induced changes in the current strength and bathymetric position of the Mediterranean Outflow Water (MOW). Three environmental locations are considered to study ichnofauna distribution : seafloor bathed by the Mediterranean Upper Water (MUW), seafloor bathed by Mediterranean Lower Water (MLW) and seafloor located away from

MOW. A detailed ichnological study is presented including both spatial and temporal variation in the composition of the Gulf of Cadiz ichnofauna. Eight different ichnocoenoses are observed in the cores, Chondrites, Diplocraterion, filaments, Nereites, Paleophycus, Phycosiphon, Thalassinoïdes, and Zoophycos as well as indistinct biogenic structures. Comparison between the response of the ichnocoenoses and changes in bottom-water conditions and substrate between the cores studied indicate that bottom-water oxygenation, sedimentation rates, food availability and food flux along the sea floor are the most important parameters controlling the variations in bioturbation. The spatial and temporal distribution patterns are in good agreement with earlier models of the MOW history, which suggest to interpret trace fossils as a complementary tool for paleoceanographical studies.

## 2.5 La remobilisation sédimentaire, de l'observation aux phénomènes physiques sous-jacents (ASF)

### Responsables :

- Patrice Imbert (Total, Pau)  
patrice.imbert@total.com
- Aurélien Gay (Géosciences Montpellier)  
aurelien.gay@gm.univ-montp2.fr

### Résumé :

La remobilisation sédimentaire est la déformation à toutes échelles des dépôts sous l'effet des circulations de fluides au sein de la pile sédimentaire. On peut citer le volcanisme de boue, les « pockmarks » comme exemples les plus spectaculaires. La précipitation de carbonates chimiosynthétiques en surface ou à faible profondeur, la cristallisation d'hydrates à partir de gaz qui migrent et la dissolution ou dissociation ultérieure de ces hydrates, certaines déstabilisations de pentes sont d'autres phénomènes qui participent de ce domaine de la "remobilisation sédimentaire".

La session a pour objectif de réunir des contributions focalisées soit sur l'observation du phénomène (à l'affleurement ou par des méthodes indirectes comme la sismique), soit sur les processus physiques eux-mêmes, en particulier le comportement des sédiments dans les premières centaines de mètres sous le fond de mer.

### 2.5.1 (o) Investigation of different sediment deposits morphologies in the Santos Basin, Brazilian margin

Agnès Baltzer<sup>1</sup>, Massinissa Benabdellouahed<sup>2</sup>, Marina Rabineau<sup>3</sup>, Daniel Aslanian<sup>2</sup>, Maryline Moulin<sup>2</sup>, Adriano Viana<sup>4</sup>, Frauke Klingelhofer<sup>2</sup>, Philippe Schnurle<sup>2</sup>, Mikael Evain<sup>2</sup>, Caesar Rigoti<sup>4</sup>, Afonso Loureiro<sup>5</sup>, Daniela Alves<sup>6</sup>

<sup>1</sup>LETG, Nantes

<sup>2</sup>IFREMER, Plouzané

<sup>3</sup>IUEM, Plouzané

<sup>4</sup>Petrobras, E&P, Rio De Janeiro, Brésil

<sup>5</sup>Instituto Dom Luiz, Lisboa, Portugal

<sup>6</sup>Faculdade de Ciências, Lisboa, Portugal

Data presented in this paper were collected during the scientific Petrobras-Ifremer SanBa cruise (December 2010/January 2011) that took place in the South-eastern Brazilian margin. These new data (chirp and swath bathymetry) allowed to describe the morphology of different superficial sedimentary features occurring in the Santos Basin slope and the São Paulo Plateau. The area is dominated by different erosional and depositional processes that occur from the outer continental shelf down to the distal margin. Undulated deposits predominate along the continental slope and can be associated either to slope instabilisation processes or to the action of bottom currents. The observed instabilisation processes comprise creeping, sliding, slumping and debris flows. Salt diapirism is another mechanism of sediment perturbation by piercing the sedimentary column and inducing local sea floor instabilisation as much as acting as topographic constraints for the oceanic circulation, resulting in local acceleration of the bottom currents enhancing their ability to rework sediments. In the distal margin, large solitary channels up to 5 km wide and more than 70 km long are developed over quite gentle slope, probably originated by sediment fabric dilution due to instabilisation processes and transport of large amount of sediments. Bottom currents action is conspicuous along the whole studied area, with the development of different type of contourite deposits.

### 2.5.2 (o) Hydrogeology of glaciated continental margins and significance to slope instability : Constrains from permeability-compressibility tests and modeling off Storfjorden, NW Barents Sea.

Jaume Llopart<sup>1</sup>, Roger Urgeles<sup>2</sup>, Angelo Camerlenghi<sup>3</sup>, Renata Lucchi<sup>3</sup>, Michele Rebesco<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>Universitat de Barcelona, Espagne

<sup>2</sup>Institut de Ciències del Mar, Barcelona, Espagne

<sup>3</sup>Instituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale-OGS, Trieste, Italie

Climate variations control sediment supply to the continental slope as well as glacial advances and retreats, which (a) cause significant stress changes in the sedimentary column and redistribution of interstitial fluids, (b) induce a particular margin stratigraphic pattern and permeability architecture and (c) are at the origin of isostatic adjustments that may reactivate faults. Therefore, the hypothesis that climate change is a first order control on timing and location of arctic submarine slope failure can be drawn. We test this hypothesis using a combination of geophysical and geotechnical data from the Storfjorden Trough Mouth Fan, off southern Svalbard. Available results already indicate that submarine slope failure is widely present in the area, and is controlled by thickness of deglacial plumes. A Laboratory program is underway to test the

compressibility and permeability characteristics of glacial diamictons and interglacial sediments, the main sediment types in the area, and how burial affects these sediment properties that control interstitial fluid flow and pore pressure build-up. The results are used together with margin stratigraphic models obtained from seismic reflection data, as input for finite elements numerical models to understand focusing of interstitial fluids in glaciated continental margins and influence on timing and location of submarine slope failure. Available results indicate that significant overpressure (0.7; ratio between pore pressure and overburden stress), that persists to Present-day, started to develop in response to onset of Pleistocene glaciations. Margin progradation controlled the location of depocenters resulting in maximum overpressures at the upper continental slope at a depth of between 800-1500 m below seafloor. This depth range is in agreement with the depth of detachment observed in various slope failures in the arctic region, indicating that overpressure development could be a major control in arctic submarine slope failure.

### 2.5.3 (o) Analysis of a deep marine MTC in the Eocene Ainsa syncline, South Pyrenees Basin : from geometric analysis of soft sediment deformation to timing of deformation

Jakub Fedorik<sup>1</sup>, Christelle Butault<sup>1</sup>, Patrice Imbert<sup>2</sup>, Francis Odonne<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

A mass-transport complex (MTC) outcropping in the Ainsa Syncline (S Pyrenees Basin) was studied in order to investigate its rheology and timing of emplacement / deformation through an analysis of its internal deformation. The MTC crops out along a 2.2 km transect and is 1 to 12 m thick. The middle part of outcrop shows an increase in thickness in the direction of sliding, compared to the marginal parts of the outcrop, where the MTC is thinner and rests on stratigraphically higher levels of the undeformed sediments below. The thickness decrease is thus interpreted to correspond to the lateral and frontal parts of the MTC where the transported mass overran the seafloor.

The MTC is made of a stack of three units with different facies. Unit 1 at the base is a debris flow deposit composed of 70 % of bioclastic grains-tone debris embedded in 30 % of clayey matrix. Unit 2 above represents the bulk of the MTC; it is mainly constituted of slumped alternations of silt and clay. Unit 3 at the top is composed of homogeneous bioclastic grainstone showing occasional faint stratification.

The direction of sliding was deduced from the geometry of the folds observed in unit 2. The anticline folds mostly belong to classes 2 and 3 of the Ramsey (1967). The anticline hinges from unit 2 are broken by clay injections, which is not the case for syncline hinges. The folded layers which compose hinges are broken in several places of one hinge, showing that deformation and injection of fluid clay were brief.

The bedding at the base of the grainstone unit is parallel to folded beds of unit 2, indicating that grainstone deposition started before folding occurred; in addition flat bedding at top indicates that grainstone deposition was still active when folding ceased, implying that folding took place all along the deposition of grainstone unit 3. The highest thickness of MTC is ahead of the area where the basal shear surface ramps up. The shortening of unit 2 is highest there and grainstone unit 3 is missing. Put together, these observations show that the MTC was likely emplaced over a short span of time, with deformation in the slump accompanying grainstone deposition at the top. The absence of the grainstone in distal position reflects its ponding at the back of the frontal bulge of the MTC.

### 2.5.4 (o) Mélanges et déformations souples des zones silteuses à nummulites du bassin d'avant-pays Sud-Pyrénéen (Ainsa, Espagne)

Christelle Butault<sup>1,2</sup>, Jakub Fedorik<sup>1,2</sup>, Francis Odonne<sup>1</sup>, Patrice Imbert<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

A l'Eocène moyen/supérieur le remplissage sédimentaire du bassin d'avant-pays sud-Pyrénéen d'Ainsa s'effectue du SE vers le NW. Il est guidé par la croissance de deux anticlinaux, Boltaña à l'ouest et Mediano à l'est.

La fin du remplissage de la cicatrice d'arrachement du Barranco Espuña, sur la face ouest du synclinal de Buil montre des structures de mélanges et de déformations souples. L'étude de la zone se fait sur trois affleurements, le plus au sud présentant la série de référence exempte de déformations et de mélanges entre bancs (alternance de bancs silteux avec et sans nummulites).

L'éperon situé immédiatement au nord présente les mêmes matériaux mais déformés. Le versant sud fait ressortir 3 unités dont le top est tabulaire. L'unité 1 (base) présente un mélange important des parties silteuses avec et sans nummulites, certaines nummulites se retrouvant isolées. L'unité 2 présente moins de mélanges, la zone silteuse à nummulites s'organise en figures de charge vers l'ouest et en réseaux de plus en plus complexes vers l'est. L'unité 3 (top) présente moins de silts à nummulites et de mélanges, mais la déformation est plus importante. Sur le versant nord de l'éperon, ces trois unités se retrouvent. Elles sont plus épaisses et présentent une quantité de mélanges moins importante et une déformation équivalente.

Il apparaît que la quantité de mélange augmente à la fois vers le bas de la série et vers l'est de l'affleurement. La déformation semble également répartie entre le haut et le bas de la série mais les figures de charge, d'échelle quasi-métrique, sont observables sur l'unité 3 au nord alors que des « injections » parallèles, à petites nummulites, sont visibles vers l'ouest sur l'unité 2.

On recherche dans la résistance au cisaillement du matériau silteux, avec et sans nummulites, et dans les contrastes de densité dus à la présence de nummulites un moteur expliquant la quantité et la nature des mélanges ainsi que leur augmentation vers le bas et l'est.

### 2.5.5 (o) Gas escape versus slope stability : curse or blessing ?

Vincent Riboulot<sup>1</sup>, Patrice Imbert<sup>2</sup>, Antonio Cattaneo<sup>1</sup>, Michel Voisset<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IFREMER, Plouzané

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

Gas seepage to the seafloor through « pockmarks » contributes significantly to the destabilization of the sedimentary column and can be an effective triggering mechanism to generate submarine landslides. Pockmarks are thus commonly listed among geohazards. Here, we propose an alternative view about pockmarks with an example from the eastern Niger submarine delta, a spectacular site to study landsliding and fluid seepage. The detail analysis of a selected dataset of 3D seismic reveals that the relationships of fluid escape and seafloor instability could be more complex than commonly stated and in particular that fluid escape could contribute in some way to soil strengthening. Pockmarks and the associated chimneys, characterized by a downward deflection or a truncation of seismic reflections, can increase the shear strength of sedimentary layers and locally enhance seafloor stability, possibly through cementation. The analysis of two 3D seismic volumes shows that the two

lateral lobes of the NG2 landslide and their pressure ridges deflected around the pockmark stacks indicate that chimneys act as an obstacle to landslide advancement. The resistance opposed by this obstacle possibly added to the interruption of the weak layer by chimneys are responsible of the deflection of the landslide path. The NG2 landslide was blocked by a small cluster of pockmark chimneys which behaved as fixed, high mechanical resistance pillars. We speculate that the chimneys of three pockmarks are overall cemented by carbonates, giving them more resistance to shear than the surrounding sediment. Gas seepage, forming the pockmarks, is likely responsible of carbonate precipitation along the gas migration pathway. This study on a landslide and associated pockmarks reveals an original point of view about the role of pockmarks and chimneys on slope stabilization. Pockmarks can have an unsuspected role in the structuration and stabilization of superficial sedimentary layers on continental margins.

### 2.5.6 (o) Geometric analysis of a cluster of mud volcanoes in the South Caspian Basin : evidence for collapsed sub-surface mud chambers

Matthieu Dupuis<sup>1</sup>, Patrice Imbert<sup>2</sup>, Bruno Vendeville<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosystèmes, Lille

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

We investigate the architecture of mud volcano systems using a 3-D seismic block covering an anticline in the South Caspian Basin. A geometric analysis helped us to constrain the mechanisms leading to their emplacement. The seismic character of the sedimentary pile away from the mud volcanoes is strictly continuous and parallel. A series of nine mud volcano systems ranging in age from Late Pliocene to present-day was investigated. Their plan view morphology ranges from flat mud pies to well-developed cones, with typical diameters of 2 to 5 km. In cross-section, they appear as lenticular bodies. Several of the volcanoes allow visualizing the underlying stratal geometry. It is commonly characterized by a bowl-shaped truncation surface about 1 km below the volcano, overlain by parallel strata dipping towards the center of the bowl. The base of the inward-dipping series downlaps onto the truncation surface, while its top corresponds to the base of the mud volcano lens. This geometry is interpreted to represent the collapse of a mud chamber that formed before the volcano erupted, the collapse being compensated by the emplacement of the volcano. Restoring the layers to their original parallel-continuous geometry enabled us to reconstruct the pre-eruption geometry of the chamber. The lenticular volcano is interpreted as a succession of mud flows from the mud chamber extruded radially from a central vent, the first flows now dipping inward due to the subsidence of the chamber's roof. This body wedges out into a very thin interval, and was thus emplaced over a short period of time. Although the timing of eruption varies from one volcano to the other, all the mud chambers are centered on the same stratigraphic level corresponding to evaporite layers at the top of the Productive Series Fm. Those evaporite layers could have acted as seals for fluids migrating upward from the deep. The eruption would thus be triggered by roof resistance, rather than overpressure in the chamber. Mud volcanic activity seems to start in the south of the study area and migrate northward following the growth of the anticline.

### 2.5.7 (o) Typologie des sorties de fluides en Méditerranée Orientale et leur interaction avec les processus sédimentaires et tectoniques

Flore Mary<sup>1,2</sup>, Sébastien Migeon<sup>1</sup>, Elia d'Acremont<sup>2</sup>, Daniel Praeg<sup>3</sup>, Silvia Ceramicola<sup>3</sup>, Alain Rabaut<sup>2</sup>, Christian Blanpied<sup>4</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>2</sup>iSTeP, Paris

<sup>3</sup>Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale,  
Sgonico, Italie

<sup>4</sup>TOTAL, Paris-La Défense

Sur les marges continentales, les échappements de fluides prennent le plus souvent la forme de volcans de boue et/ou cheminées gazeuses et de pockmarks. Ces fluides ont des sources variées dans la colonne sédimentaire. Ils peuvent être associés (a) à des fluides thermogéniques ou biogéniques issus de réservoirs profonds et migrant le long de failles, (b) à la dissociation plus superficielle des hydrates de gaz, (c) ou provenir de sources plus locales liés à la déshydratation de chenaux turbiditiques et de dépôts de transports en masse enfouis. Pour l'industrie pétrolière, les structures d'émissions de fluides peuvent constituer des fenêtres potentielles sur des réservoirs profonds mais également être la cause d'éventuels geohazards.

En Méditerranée Orientale, des sorties de fluides ont été identifiées dans divers contextes géodynamiques, incluant des marges actives (Prisme d'accrétion Calabrais et Ride Méditerranéenne) et des marges passives (delta profond du Nil). Une analyse a donc débuté pour mieux comprendre la dynamique temporelle de fonctionnement de ces structures et l'impact du contexte géodynamique local et régional sur leurs localisations et activités.

Des données bathymétriques et sismiques collectées sur l'ensemble de la Méditerranée Orientale ont permis d'identifier plus de 400 volcans de boue présumés dont 40 prouvés par carottage. Ces structures présentent des morphologies et des architectures variées : de forme conique, plate, circulaire à subcirculaire, en griffon au sein de caldera ou présentant des lacs de saumures. La reconnaissance ponctuelle de coulées latérales sur les flancs ou de rides concentriques sur les sommets attestent de régimes d'expulsion différents. Les clastes retrouvés dans la brèche de boue renseignent sur le niveau source de ces structures.

Le but de cette étude est d'utiliser l'ensemble de ces observations pour mieux contraindre les différents types de morphologies/architectures liées aux circulations et émissions de fluides en Méditerranée Orientale et d'en comprendre l'origine et leur formation.

## 2.5.8 (o) Evolution des associations minéralogiques (kaolinite et smectite) au cours de l'évolution diagenétique des fronts redox

Anne Murat<sup>1</sup>, Daniel Beaufort<sup>2</sup>, Benoît Hebert<sup>2</sup>, Sabine Petit<sup>2</sup>, François Baudin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Conservatoire National des Arts et Métiers, Cherbourg

<sup>2</sup>Hydrasa, IC2MP, Université de Poitiers

<sup>3</sup>iSTeP, Paris

Depuis 2011, une thématique de recherche "matières organique et minérale associées" se développe dans le cadre de l'atelier « Fluides - MO - MM » d'Action Marges. La Méditerranée est un bassin idéal pour aborder la thématique de l'éogénèse des argiles. Ces réactions minérales complexes qui opèrent dès le dépôt et dans les premières centaines de mètres de la colonne sédimentaire sont encore mal connues en particulier pour tout ce qui concerne la diagenèse silicoclastique. L'éogénèse des argiles est dépendante de la quantité de MO et des conditions de sa dégradation, de la minéralogie initiale, de l'évolution temporelle des conditions redox. Le cortège minéralogique des apports du Nil est dominé par la smectite dioctaédrique et la kaolinite, deux minéraux argileux sensibles aux changements environnementaux.

Nous avons choisi de focaliser d'abord la thématique sur les niveaux enrichis en MO (sapropèles) et les fronts redox associés. Les premiers résultats obtenus sur la carotte MD042723 (36 mètres pour 1,2 millions d'années) nous ont permis d'établir que les fronts redox existent pour

chaque cycle organique. Les minéraux argileux ont été étudiés de manière détaillée pour 7 cycles ceux des sapropèles S1, S3, S5, S6, S9, S12 et S28. Les proportions relatives de smectite et de kaolinite dans le cortège argileux ont été estimées par deux méthodes. La diffraction RX doit être considérée comme une méthode semi-quantitative d'autant plus que la destruction préalable de la phase organique est susceptible d'avoir impacté la structure des minéraux argileux les plus réactifs (smectite). La mise au point d'une méthode de spectrométrie infrarouge portable (proche infrarouge) nous permet de travailler sans prétraitement et offre de bonnes potentialités pour l'analyse quantitative. L'application de cette méthode montre que, la smectite constitue de 70 à plus de 95% du cortège argileux. La comparaison des résultats et leur confrontation avec la position des fronts redox sont en cours...

## 2.5.9 (o) Mechanical parameters controlling sandstone intrusion emplacement and geometry

Denis Bureau<sup>1</sup>, Regis Mourgues<sup>1</sup>, Joe Cartwright<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LPG, Le Mans

<sup>2</sup>Department of Earth Sciences, University of Oxford, Royaume-Uni

Hydrofracturing of the overburden and associated pressure gradient encourage injection of the fluidised sand into the fracture network. Like igneous intrusions, sandstone intrusions exhibit geometries such as dykes, sills, cone- and saucer-shaped or wings. Understanding mechanisms governing their emplacement is essential because they provide conducts for fluids through impermeable overburden and they can act as hydrocarbon reservoirs in an intrusive form of hydrocarbon trap.

Here, we use physical experiments to simulate sandstone intrusion emplacement. By increasing progressively (200Pa/min) water pressure into a reservoir (glass microspheres), a glass microsphere/water mixture was injected into the contemporary hydraulic fracture network through low permeability host rock (sand-gelatine mixture). We tested the influence of three parameters on the geometry of the intrusion complex : (1) reservoir geometry, (2) reservoir depth and (3) overburden cohesion.

We have shown that dome-shaped reservoirs favoured « wing » development on its peripheries whereas apical reservoirs favoured the formation of vertical dykes. Horizontal fractures firstly developed at the interface reservoir/overburden prior to wing like fractures initiation. An increase of overburden cohesion led to a decrease of wing dip and seemed to increase dyke to cone transition depth. Increasing depth caused wings to be initiated closer to the central portion of dome-shaped reservoir. At greater depth, a dyke could form at the top of dome-shaped reservoirs.

Physical experiment is also a powerful tool to assess the dynamic of emplacement during intrusion processes. When wings on both sides of the reservoir developed synchronously, they tended to be symmetric. However, when one developed before the other, the second one tended to be more vertical. This second wing was more prone to bifurcate close to the surface forming cone or stacked cones. Fracture propagation velocity increased with decreasing overburden cohesion, with increasing depth and with increasing fracture dip. An increase of fracture propagation velocity has also been observed when fluidisation processes started into the reservoir. Finally, all fractures of the system were not intruded by the fluidised mixture and the reservoir was not necessarily entirely fluidised.

## 2.5.10 (o) Sand injection associated to channel margin instability on the Upper Miocene to Pliocene turbidite deposits of the Inner Kwanza basin (Angola)

Michel Lopez<sup>1</sup>, Cirilo Cauceiro<sup>2</sup>, Christian Seyve<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Géosciences Montpellier*

<sup>2</sup>*Universidade Agostinho Neto Luanda, Angola*

<sup>3</sup>*TOTAL EP ANGOLA, Luanda, Angola*

The Inner Kwanza basin was uplifted during Cenozoic time and submitted to continentalization, with present day sub-continuous outcrop of Miocene to Pliocene turbidites along the coastal cliffs from do Sao Braz to Barra do Cuanza. More particularly on the Sangano beach, 70km south Luanda we evidenced peculiar post-depositional sand bodies cross-cutting Upper Miocene turbidite channel margin deposits.

The sand injection network was found above a major erosional surface at the channel-inner levee transition of the southern flank of a 150 meters wide turbiditic channel. It is mainly composed of pluri-decimeter-thick medium to fine parallel laminated sand layers sandwiched with greenish gray pelites indicating the alternation of high velocity plane bed transportation and suspension settling at the channel margin. Close to the erosional surface several sandy layers show a duplex system by channelward sliding over a major decollement plane at the base of the bed. Some beds are thickened by antiformal stack during a forward breaking slide sequence. These antiformal structures are topped by multiple staggered fine to medium well sorted sand injections, following and crosscutting successively the bedding plane with a bayonet-like pattern.

This architecture is interpreted as a syn-sedimentary gravity driven slide sequence through the unconsolidated inner levee deposits during a main turbiditic event, with partial erosion of previous axial deposits. The instantaneous pressure gradient associate to both the decollement and the anticlinal stack, approaches the lithostatic pressure and led to lateral dewatering with partial fluidization and injection of the sand through the sandwiched pile above the antiformal stack. This syn-depositional injectite process must be taken into account for evaluating reservoir potential of inner levee deposits.

### 2.5.11 (o) Premières estimations du potentiel de stockage du CO<sub>2</sub> sous forme d'hydrates de gaz dans les formations sédimentaires du Golfe de Gascogne et de la Mer Celtique (offshore profond)

Andre Burnol<sup>1</sup>, Isabelle Thimon<sup>1</sup>, Pascal Audigane<sup>1</sup>, Aurélien Leynet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*BRGM, Orléans*

Le stockage du CO<sub>2</sub> à haute température à l'état supercritique dans des aquifères salins profonds est l'option de stockage géologique la plus étudiée à ce jour (option « onshore » ou « offshore peu profond »). Il existe cependant une autre option à basse température, encore peu explorée, qui consiste à stocker le CO<sub>2</sub> sous forme d'hydrates de gaz dans des sédiments marins profonds (option « offshore profond »).

La capacité de stockage sous forme d'hydrates de gaz dépend fortement du gradient géothermique local, ainsi que de la quantité et la nature des impuretés dans le CO<sub>2</sub> après le processus de capture. Afin d'évaluer l'influence de ces deux paramètres, un nouvel outil numérique utilisant des modules indépendants et validés expérimentalement (GERG-2008, CSMGem) a été conçu, développé et appliqué dans la zone économique exclusive (ZEE) du Golfe de Gascogne, d'une part, et dans la zone d'extension du plateau continental en Mer Celtique d'autre part.

En considérant moins de 4% de N<sub>2</sub> ou/et de CH<sub>4</sub> comme impuretés, la capacité de stockage estimée dans la zone économique exclusive (ZEE) de la France dans le golfe de Gascogne est plus élevée que celle des aquifères salins profonds du bassin de Paris (Dogger et Trias). De plus, cette capacité de stockage serait doublée si l'on inclut la zone d'extension du plateau continental en Mer Celtique.

Ces premiers résultats nous ont permis d'identifier les principales propriétés qui doivent être mesurées dans des conditions de haute pression (entre 40 et 60 MPa) afin d'améliorer les modèles utilisés pour du

CO<sub>2</sub> avec les impuretés associées. Une feuille de route expérimentale est proposée afin de démontrer la faisabilité et les limites potentielles d'un stockage en offshore profond du CO<sub>2</sub>. Les implications de cette recherche sont potentiellement importantes pour la stratégie de déploiement du stockage du CO<sub>2</sub> à long terme à la fois en France et en Europe de l'Ouest.

### 2.5.12 (o) Relationship between natural oil seeps and submarine morphology

Romain Jatiault<sup>1</sup>, Damien Dhont<sup>1</sup>, Dominique Dubucq<sup>1</sup>, Patrice Imbert<sup>1</sup>, L. Loncke<sup>2</sup>, Denis Levaché<sup>1</sup>, Veronique Miegbielle<sup>1</sup>, Eric Cauquil<sup>3</sup>, Thi Kim Lan Ho<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau*

<sup>1</sup>*CEFREM, Perpignan*

<sup>3</sup>*Total, Paris-La Défense*

Natural oil seeps detection provides strong proof of an active petroleum system in deepwater exploration programs. Remote sensing imagery is a powerful tool for their recognition. A first-class natural laboratory for oil seeps studies has been identified on the West African margin benefiting from favorable oceanic and meteorological conditions for oil detection but also of the great quantity of natural oil seeps in the basin. This study integrates multidisciplinary datasets : synthetic aperture radar (SAR) from satellites, geochemical analysis from drop cores and geophysical data from 3D exploration seismic and high-resolution 2D AUV (Autonomous Underwater Vehicle) seismic utilized for site survey. The compilation on a map of natural oil seeps as seen on SAR records over time reveals typical « flower structures », where each petal represents a single seepage episode. The orientation and the shape of each petal is a record of sea surface currents. The convergence point of the structure shows the mean point of oil impact at the sea surface. The dispersion of individual impact points around the center of the structure, induced by oceanic drift is less than 1000m, which allows us to well constrain the origin of the seeps. Seafloor fluid escape features include large conical pockmarks, clusters of small pockmarks and high-reflectivity mounds. Sites associated with active seepage at the surface correspond to the last two categories, which are interpreted to correspond to gas escape features and methane-derived carbonates, respectively. Instead, conical pockmarks are not associated with surface oil seeps. Pervasive salt tectonics widely contributes to the creation of oil migration pathways to the surface. Leaking hydrocarbons therefore seem to be a mixture of oil and gas, in agreement with geochemical drop core analysis showing a mixture of oil and thermogenic gas. In addition, 3D seismic data show evidence of a Bottom-Simulating Reflector underneath active oil seeps.

### 2.5.13 (o) Le méthane, trublion des bassins sédimentaires

Patrice Imbert<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau*

Le fondement de la géologie moderne, c'est le principe de superposition : une couche à la fois, les plus anciennes en bas, et les archives de notre Terre seront bien gardées. La tectonique peut ensuite déformer, casser et déplacer, le principe de superposition permet de remettre les choses dans l'ordre. Dormons tranquilles ! Mais par moments la machine se grippe... un volcan de boue fait jaillir à la surface des sédiments enfouis à plusieurs kilomètres, des pans entiers de pentes continentales glissent en un clin d'œil vers les grandes profondeurs, des oasis de vie fleurissent dans les abysses là où aucune lumière ne parvient jamais, des km<sup>3</sup> de sable remontent de centaines de mètres à travers la plie sédimentaire, l'océan mondial éructe d'un coup suffisamment de gaz pour réchauffer toute la planète de 5 degrés, des cratères kilométriques se forment sous couverture sans qu'on puisse retrouver les

produits évanouis. La sismique 3D a mis en lumière le caractère ubiquiste de la remobilisation sédimentaire et des échappements de fluides. Parmi les moteurs de cette activité qui défie bien souvent les principes établis, le méthane occupe une place de choix. Véritable trublion de la chaîne sédimentation / déformation, le méthane ne s'embarrasse guère des principes publiés : il semble n'avoir qu'un but, arriver à la surface, et... ça passe ou ça casse ! Le méthane contribue fréquemment au déclenchement d'instabilités sous-marines. Il semble être à la source de l'événement hyperthermal de la limite Paléocène-Eocène. Le volcanisme de boue des prismes d'accrétion et les cratères (pockmarks) qui grèlent bien des fonds sous-marins témoignent pour beaucoup de l'échappement de méthane. Les suintements froids en sont une manifestation plus discrète, mais nous rappellent en un lointain écho ce qu'a pu être le développement de la vie sur Terre avant que n'apparût la photosynthèse... Qu'y a-t-il donc de si spécial dans le méthane, fluide le plus abondant après l'eau dans les bassins ? Sa densité d'abord, qui le pousse vers la surface ; mais aussi sa capacité à geler en hydrates, sa compressibilité, sa solubilité fluctuante dans l'eau de formation et... sa comestibilité pour des consortiums bactériens qui convertissent en carbonates durables un gaz qui ne faisait que passer. Ces caractéristiques et son abondance lui assurent ce rôle unique et spectaculaire.

### 2.5.14 (o) La remontée du niveau marin comme déclencheur des expulsions de fluides dans les bassins : exemple dans le golfe du Lion

Aurélien Gay<sup>1</sup>, Tania Marsset<sup>2</sup>, Yannick Thomas<sup>2</sup>, Bruno Marsset<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geosciences Montpellier

<sup>3</sup>IFREMER, Plouzané

De nombreuses études ont tenté d'établir un lien entre les zones de sorties de fluides et leur source en profondeur (Gay et al. 2007 et références, Anka et al., 2012). Pourtant, l'architecture précise du réseau de migration est restée incertaine pendant longtemps. L'utilisation dans le milieu académique à partir des années 2000 de données de sismique 3D et d'imagerie haute résolution des fonds marins a permis de réaliser des avancées significatives en définissant d'abord une signature géophysique : les conduits de fluides, dont le diamètre peut atteindre 150-200 m, peuvent être identifiés sur les profils sismiques grâce au gaz qu'ils contiennent ou aux carbonates qui ont précipité par interaction biochimique avec l'encaissant sédimentaire. Ces cheminées, lorsqu'elles atteignent le fond de la mer, sont généralement « coiffées » d'une sortie de fluides (pockmark ou volcan de boue).

Nous montrerons que la combinaison de plusieurs attributs sismiques sur des données 3D THR (Très Haute Résolution) permet d'identifier la déformation induite des sédiments environnants par la propagation d'un conduit. Cette approche permet de mieux caractériser son architecture interne et de définir précisément le point d'initiation de la migration (i.e. sa source) et son point d'expulsion (i.e. pockmark actuel ou paleo-pockmark). Cela permet de mettre en évidence les périodes d'expulsion de fluides qui correspondent toutes à des remontées du niveau marin corrélées aux cycles glaciaires-interglaciaires.

Ce type d'approche est absolument indispensable pour définir l'état d'un conduit (actif, fossile ou réactivation potentielle). Cela a des implications fortes sur l'identification des paramètres qui contrôlent l'expulsion et donc sur la détermination du risque associé à une expulsion brutale de fluides, par exemple liée à une activité anthropique (pose de câbles, ancrages etc...). Cela a aussi un impact fort sur l'expulsion de quantités importantes de gaz à effet de serre (principalement du méthane) et donc sur les changements climatiques.

Anka, Z., Berndt, C. and Gay, A. (2012). Hydrocarbon Leakage through focused fluid flow systems in continental margins. *Marine Geology*, 332-334 : 1-3.

Gay, A., Lopez, M., Berndt, C. and Séranne, M., (2007). Geological

controls on focused fluid flow associated with seafloor seeps in the Lower Congo Basin. *Marine Geology*, 244 : 68-92.

### 2.5.15 (o) Skyscraper sized hydrothermal vents and chimneys buried below the Mozambique Channel

Gérôme Calves<sup>1</sup>, Jean-Pierre Ponte<sup>2</sup>, Stephan Jorry<sup>3</sup>, François Guillocheau<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Geosciences Rennes

<sup>3</sup>IFREMER, Plouzané

During intrusion of thermal sources in sedimentary basins fluids present in the pore space are expelled through fracture, vertical and lateral geological discontinuities. When extrusion occurs, these fluids and remobilized sediments can be accumulated as chimney, mounds and associated with chemosynthetic organisms. Here we investigate the shape of mounds outcropping at the seafloor and buried in the sedimentary succession of the Davie Ridge and Morondava Basin. Two modes of geophysics data acquisition are used to describe the vent structures (1) multibeam bathymetry survey and (2) ship-based geophysical survey. We have found that mounds are rooted by hydrothermal vents sourced from the intrusion of volcanic sills in the sedimentary strata. However, other origin for these vents and associated mounds cannot be precluded due to limited samples. The most important point of this study is that the Sakalave mounds and vents compared to other identified hydrothermal vents and structures worldwide, is to our knowledge the highest and steepest expression of hydrothermal vent-mounds yet discovered.

### 2.5.16 (o) A new type of methane-escape structure linked with the Bottom Simulating Reflector (BSR) on the slope of the Lower Congo Basin

Viviane Casenave<sup>1,2</sup>, Patrice Imbert<sup>1</sup>, Aurélien Gay<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>2</sup>Université Montpellier 2

The Southwest African continental margin is well known for the occurrence of active seepage of methane-rich fluids associated with seafloor pockmarks at water depths ranging broadly from the shelf to the deep basin.

On the Congo slope, at about 650 water depth, the combined use of high-resolution 3D seismic data and 2D AUV seismic data has revealed the presence of km-scale irregular patches on the seafloor. Detailed analysis of the seismic geomorphology of this seep shows that the feature is made up of two different facies. Seismic facies A corresponds to two sub-circular depressions respectively covering areas of about 1.2 km<sup>2</sup> and 0.3 km<sup>2</sup>. Seismic facies B corresponds to narrow furrows up to 150 m wide and 1200 m long. They appear to originate and expand upslope from the two circular depressions. 3D seismic data show that the patches of facies A are underlain by a bottom-simulating reflector (BSR) indicating the presence of methane hydrates some 80 ms twt below seafloor. The BSR is slightly oblique to the seafloor due to the close proximity to the limit of the upslope wedge of the hydrate stability domain.

The seep was surveyed and sampled with the use of a remotely operated vehicle (ROV). The underwater cameras of the ROV have revealed macroscopic evidence of benthic communities on the seafloor of this seep structure such as tubeworms, clams, galathea living in the furrow-like depressions. This abundant life is associated with the presence of massive carbonate slabs with a flat top. The ROV was also equipped with articulated arms which allowed sampling both the carbonates and the surrounding water. Analysis of the latter has revealed a significant

amount of methane in the water column.

The high methane values and the geomorphology of the studied fluid flow structure are interpreted to be linked with gas escape from the BSR. This analysis tries to understand the process which led to the setting up of the studied fluid flow structure in order to propose a model for the evolution of this system.

### 2.5.17 (o) Mécanismes de mise en place de seep carbonates en relation avec le système d'alimentation de fluide sous-jacent. Exemple de concrétions et d'injectites sableuses dans les Panoche Hills de Californie

Jean-Philippe Blouet<sup>1</sup>, Patrice Imbert<sup>2</sup>, Ivano Aiello<sup>3</sup>, Anneleen Foubert<sup>1</sup>, Hilde Schwartz<sup>4</sup>, Catherine Pierre<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Université de Fribourg, Suisse

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>3</sup>Moss Landing Marine laboratory, Moss Landing, CA, États-Unis

<sup>4</sup>University of California, Santa Cruz, États-Unis

<sup>5</sup>LOCEAN, Paris

Les Panoche Hills, en Californie centrale, offrent l'opportunité unique d'étudier des seep carbonates, développés juste sous le fond de mer, en relation directe avec la « plomberie » (plumbing system) sous jacente, constituée d'un complexe d'injectites sableuses (Schwartz and Minisini, 2007).

Le complexe d'injectites est constitué de dykes et des sills provenant de réservoirs turbiditiques de la Panoche formation (Campanien) qui ont pénétré par fracturation hydraulique les 700m sus-jacents de la formation argileuse du Moreno. Les sables font localement éruption au Paléocène, déposant une couche sableuse d'extrudite.

Des concrétions carbonatées sont très largement développées dans la Cima Lentil. Elles sont considérées comme des seep carbonates sur la base d'un très bas  $\delta^{13}\text{C}$  (jusqu'à -46‰PDB), et de la présence d'organismes chimiosynthétiques (Schwartz and Minisini, 2003 ; Minisini et al. 2007)

Un groupe de concrétions a été observé en connexion directe avec le sommet d'un dyke, ce qui constitue la première évidence d'un lien géométrique entre injectites et concrétions. Les dix derniers mètres du dyke sont auréolés de nodules de diamètre décimétrique et son extrémité est chapeauté par un monticule de diamètre métrique.

Le monticule contient des centaines de nodules centimétriques, ainsi que des bioturbations tubulaires entourées d'un manchon calcaire. Ces deux structures exhibent sous UV (360 nm) des bandes concentriques anisopaques. A l'intérieur des tubes, deux générations de ciments alternent avec deux dépôts micritiques. Tous ces éléments sont englobés et localement recoupés par la matrice du monticule, puis par des fractures de septaria remplies de 9 générations de ciments (carbonates, hématite et quartz).

L'analyse du  $\delta^{13}\text{C}$  et du  $\delta^{18}\text{O}$  de 70 échantillons doit aider à préciser l'histoire polyphasée de mise en place des concrétions, et à distinguer les phases de diagenèse précoce, liée au suintement d'hydrocarbures, et celles éventuellement plus tardives.

### 2.5.18 (p) Multiple BSR offshore Peru, causes and quantification of hydrate stability field

Gerome Calves<sup>1</sup>, Constance Auguy<sup>1</sup>, Stephane Brusset<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

The aim of this work is to document the geometry of a margin where previously hydrates have been documented by acoustics or well core samples, but yet undescribed for multiple BSRs, and to discuss the potential origins for such occurrence in this margin. We have used 3D seismic reflection survey to map these multiple BSR.

### 2.5.19 (p) Spatial variations in geometries of polygonal faults due to stress perturbations & interplay with fluid venting features

Sutieng Ho<sup>1</sup>, Dan Carruthers<sup>1</sup>, Patrice Imbert<sup>2</sup>, Joe Cartwright<sup>1</sup>, Jean-Philippe Blouet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Earth and Ocean Sciences, Cardiff, Royaume-Uni

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>3</sup>Université de Fribourg, Suisse

3D seismic data from Offshore Angola is used to investigate how vertically migrating fluids were influenced by strata-bound arrays of compaction-related normal faults, here called polygonal faults (PFs), which deform Neogene-Quaternary hemipelagites. We discuss the sensitivity of fluid venting style to perturbations in the regional stress state due to salt tectonics, and locally due to salt diapirs and PFs. Regionally isotropic PFs become anisotropic around pockmarks, salt stocks and withdrawal basins. Aligned PF are attributed to local perturbations in a predominantly isotropic stress field. Four main patterns of aligned PFs are observed : ladder patterns composed of long (first-order) and short (second-order) faults which are orthogonal, radial patterns around salt stocks, concentric patterns around pockmarks and in salt withdrawal basins, and a hybrid form of radial and concentric fault pattern around pockmarks on diapir flanks. Fluid venting structures such as methane-derived carbonates and chimneys which are linear in plan view stem from PF intersections. Chimneys consistently have a linear planform and are interpreted to have formed by hydraulic fracturing. Hydraulic fractures propagated vertically and parallel to faults along the axis of PF grabens. We deduce from that observation that the geometry and location of linear venting conduits are controlled by the location of PF intersections. Most of the fluid venting structures with linear-to-elliptical planform geometries are controlled by the local state of stress around PFs. Our work highlights the sensitivity of polygonal fault systems to perturbations of local tectonic stresses caused by salt withdrawal and diapirism. Both PFs and the location stresses further control the location and geometry of fluid venting structures.

### 2.5.20 (p) How regional stresses influence polygonal fault planes reactivation and sandstone intrusion geometry

Denis Bureau<sup>1</sup>, Regis Mourgues<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LPG, Le Mans

Sandstone intrusions and polygonal faults are recurrent structures in sedimentary basins. They both affect fluid flow providing conduits. Detailed analysis of 3D seismic data shows how hundreds of large scale conical sandstone intrusions interact with a polygonal fault network in the Faroe-Shetland basin. The intrusions were injected upwards during the Late Miocene through polygonally faulted claystones of Eocene-Oligocene age. Three types of interactions are recognized : (1) intrusions that are unaffected by polygonal faults, (2) intrusions partially or fully intruded into fault planes, and (3) intrusions arrested by polygonal faults. Type 2 intrusions are generally thinner, taller and wider, whereas those unaffected by faults are thicker and characterized by low dips of intrusive limbs (wings). It was found that Type 2 intrusions preferentially intruded into faults striking NW-SE, whereas Type 3 intrusions were arrested by faults striking NE-SW. Comparison of structural data

and simple mechanical predictions allows paleostresses to be reconstructed at the time of intrusion. We have established that the basin was undergoing anisotropic horizontal stresses at the time of intrusions in which  $\sigma_H$  and  $\sigma_h$  were oriented N145°E and N055°E, respectively. Intrusion depth, polygonal fault 79 dips and strikes have been used to quantify paleostress intensity and to give a  $\sigma_H/\sigma_V$  ratio close to 0.95 and a  $\sigma_h/\sigma_H$  ratio of 0.8. These ratios support the conclusion that sandstone intrusion emplacement occurred just after a Mid-Late Miocene SSE-NNW (N145°E) compressional phase when the compression direction had decreased in intensity and became smaller than lithostatic stress ( $\sigma_v$ ).

### 2.5.21 (p) Exemple sismique d'intrusions sableuses (injectites) coniques dans le bassin du Bas-Congo et présentation d'un possible analogue de terrain dans le bassin Vocontien

Damien Monnier<sup>1</sup>, Patrice Imbert<sup>1</sup>, Aurélien Gay<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier

Des injectites coniques de grande échelle ont été mises en évidence sur des données de sismique 3D du Miocène Supérieur du bassin du Bas-Congo. Elles atteignent 80 m de hauteur et 300 m de diamètre. Elles sont alignées sur 20 km de long, au-dessus de la marge NO d'un lobe turbiditique du Miocène Supérieur interprété comme la source des injectites. La surpression pré-requise au processus d'injection peut être due à l'effet de flottabilité des hydrocarbures accumulés dans les marges inclinées du lobe source en combinaison avec le transfert latéral de pression. La très courte durée d'injection du sable à la limite Miocène-Pliocène suggère que le processus d'injection a été initié par un événement soudain, probablement dû au jeu d'une faille en relation avec des mouvements de diapirs. La caractérisation architecturale de ces structures injectées est limitée par la visibilité sismique. Par conséquent un réseau d'injectites affleurant dans le bassin Vocontien a été étudié comme un possible analogue. Dans cette zone, un large réseau d'injectites associées à des chenaux turbiditiques affleure dans les marnes apto-albiennes. Le réseau d'injectites est composé de dykes et de sills d'épaisseur millimétrique à métrique, ainsi que de laccolites d'épaisseur pluri-métrique. Le plus gros laccolite de la zone atteint environ 100 m de diamètre et plus de 30 m d'épaisseur. Il est associé à un réseau de sills et dykes qui se propagent depuis ces marges vers la surface pour former des structures nommées « wings ». La géométrie et les dimensions de la structure injectée entière (laccolite + wings) sont comparables à celles des injectites coniques du bassin du Bas-Congo. Ce cône semble être alimenté par un épais dyke observé juste au-dessous. L'importance de l'analogue de terrain dans la caractérisation architecturale fine d'objets identifiés sur la sismique est soulignée par cet exemple.

### 2.5.22 (p) Les extrudites existent, nous les avons rencontrées !

Vincent Riboulot<sup>1</sup>, Patrice Imbert<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IFREMER, Plouzané

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

Les injectites sableuses font l'objet d'une abondante littérature, depuis les premières observations d'affleurement il y a plus d'un siècle jusqu'aux nombreuses études sismiques qui se sont succédées au fur et à mesure que l'observation en sismique 3D montrait leur caractère ubiquiste dans certaines régions comme la marge nord-Atlantique européenne. L'existence des extrudites, sables expulsés en surface lors du

processus d'injection a été démontrée à l'affleurement essentiellement à travers des édifices de petite taille (volcans de sable, généralement de moins d'1 m d'épaisseur), et postulée sur quelques exemples sismiques de Mer du Nord avec une qualité d'imagerie limitée (Hurst et al., 2011). Un exemple sismique d'Afrique de l'Ouest met en évidence deux corps sédimentaires poreux partiellement remplis de gaz, longs respectivement de 2 et 3 km et larges de quelques centaines de m, et dont la base est affectée de stries longitudinales. Ces deux corps déposés en mer profonde émanent du même point-source situé sur le flanc d'un anticlinal isolé, en relief vis-à-vis du fond de mer de l'époque de mise en place, et s'enracinent sur une faille active au moment de l'emplacement et qui recoupe un complexe de chenaux turbiditiques 100 à 200 m plus en profondeur. Bien que les tentatives d'identification de la zone « déplétée » à l'origine de l'expulsion n'aient pas abouti jusqu'ici, le fait que les corps poreux émanent d'un point isolé sur la pente continentale conduit à les interpréter comme extrudites en provenance des chenaux turbiditiques immédiatement sous-jacents. Dans un autre bassin de la même marge, des corps sismiques frondescents qui semblent sortir d'une faille majeure, également en contexte turbiditique et sans lien apparent avec une source de sable sur la plate-forme pourraient également correspondre à des extrudites. La présence de gaz dans les deux bassins pourrait avoir aidé à la mise en place de corps de grande échelle, dans la mesure où la compressibilité élevée du gaz nécessite pour remise à l'équilibre des pressions une durée d'expulsion bien supérieure à ce qu'elle serait pour des sables surpressurisés à l'eau seulement.

### 2.5.23 (p) Seismic evidence of gas hydrate, multiple BSRs and fluid flow offshore Tumbes Basin - Peru coast

Constance Auguy<sup>1</sup>, Gerome Calves<sup>1</sup>, Ysabel Calderon<sup>2</sup>, Stephane Brusset<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>PERUPETRO, Pérou

Identification of an undescribed hydrate system in the Tumbes Basin, localized off the north Peruvian margin near latitude of 3°30' - 4°S, allow us to enrich the documentation about gas hydrates of convergent margins, and complete the 36 hydrate sites already identified in the Pacific rim. Using a combination of seismic dataset (2D and 3D), we report a detailed analysis of amplitude anomalies related to the presence of gas hydrate and/or free gas in sediments. Our observations and results prove the occurrence of Bottom Simulating Reflectors (BSRs), several BSR-type reflectors reported beneath the Gas Hydrate Stability Zone (GHSZ) identified as residual BSRs, and vertical acoustic discontinuities associated with fluid flow and gas chimneys observed in the intra-slope Mancora Basin. The GHSZ is locally affected by fluid migration and upward movement related to the geodynamic evolution of the margin. We conclude that the presence of gas hydrate and fluid flow in the Tumbes and Mancora Basins is related to an upward migration of gas, coming from sources located below the GHSZ. The gas may come from the dissociation of hydrate after an upward displacement of the base of the GHSZ, as testify the several residual BSRs observed in seismic data, or from gas reservoirs from where fluid seeps may escape and migrate updip into the hydrate stability field, as it seems the case in the Mancora Basin.

### 2.5.24 (p) Mud volcanoes, mud chambers and deflated subsurface craters : a continuum of km-scale gas migration features

Patrice Imbert<sup>1</sup>, Matthieu Dupuis<sup>2</sup>, Sutieng Ho<sup>3</sup>, Damien Monnier<sup>1</sup>, Francis Odonne<sup>4</sup>, Bruno Vendeville<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>2</sup>Géosystèmes, Lille

<sup>3</sup>Austin, TX - États-Unis

<sup>4</sup>GET, Toulouse

Mud volcanoes are most of the time associated with gas expulsion, thermogenic methane 80 % of the time (Etiopie, 2009). This observation raises the issue of the actual role played by gas : is it merely a common ingredient of sedimentary basins, in that case just released by mud ascension, or is it part of the very engine of mud volcanism ? A compilation of seismic data from various sedimentary basins illustrates a continuum between mud volcanoes with a deflated chamber underneath (Dupuis et al., this session), aborted chambers, sediment evacuation craters without associated volcano, « brine lakes » and live hydrate pockmarks as observed in the deep offshore part of the Niger Delta (George & Cauquil, 2007 ; Sultan et al., 2010). Most of these features are located at or near crests of anticlines ; some show evidence of an underlying accumulation of gas. These suggest that gas is more than a mere circumstantial ingredient of these systems. Recent experimental work by Sultan et al. (2012) has shown that depressurization of sediment samples filled with gas-saturated water leads to gas exsolution along with sediment damage, i.e. a decrease in shear strength. In the light of these experiments, it is proposed that most of the features shown could have been caused by gas exsolution in subsurface leading to formation damage and failure, either in situ without subsequent displacement (mud chambers, perhaps the brine lake described by Dupré et al. (2014)), or leading to collapse and eventual expulsion of the sediment up to the seafloor (mud volcanoes, the collapsed craters of Riis et al. (2005), possibly the brine lake of Aiello (2013)), or even up into the water column for them to be dispersed away as sediment plumes. It seems therefore that methane is a powerful engine for sediment remobilization, either directly in gas phase, or by exsolution from dissolved phase, or through a stage of freezing into hydrates. Progressive concentration of methane in fine-grained sediments appears to be a critical step potentially leading to massive destabilization and sediment remobilization.

### 2.5.25 (p) Analyse de la mise en place de cheminées carbonatées sur la marge active Hikurangi (Nouvelle-Zélande) : résultats préliminaires

Rosine Riera<sup>1</sup>, Ulysse Lebec<sup>1</sup>, Renaud Toullec<sup>1</sup>, Julien Bailleul<sup>1</sup>, Vincent Caron<sup>2</sup> Franck Chanier<sup>3</sup>, Pierre Malié<sup>1</sup>, Geoffroy Mahieux<sup>2</sup>, Pascal Barrier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais

<sup>2</sup>Géosystèmes, Amiens

<sup>3</sup>Géosystèmes, Lille

Des concrétions carbonatées verticales et tubulaires (« pipes ») pouvant atteindre 10 m de haut et 40 cm de large ont été décrites dans deux formations stratigraphiquement distinctes du Miocène inférieur et supérieur de la côte Est néozélandaise ; on considère i) des pipes de la formation « coast road » et celles ii) du Cap Turnagain plus haut stratigraphiquement et déjà étudiés par Nyman, 2010.

Le point commun de tous ces tubes est de se développer dans des formations uniquement argilo-silteuses d'offshore inférieur (Facies « pélagique massif » sensu Bailleul, 2007) dans des conditions paleoenvironnementales semble-t-il peu propices au développement de la vie (rareté et très faible biodiversité de la microfaune) ;

Une première étude comprenant des analyses par DRX, CL et MEB/BSE a été effectuée sur plusieurs échantillons clés. Les cheminées sont composées de deux ensembles : le sédiment encaissant et les différentes phases d'injection parfois cristallisées. Le sédiment encaissant

correspond à une boue carbonatée riche en quartz et feldspaths remaniés anguleux. De la glauconie, de la pyrite, des débris de foraminifères benthiques et des holothuridès peuvent également y être observés (Cap Turnagain) Les cheminées du Cap Turnagain présentent des phases de remplissage principalement composées de dolomite et d'aragonite. Des phases de dissolution au niveau du rebord interne des cheminées ont été observées, mais également au sein des cristallisations aragonitiques qui pourraient provenir, pour certaines d'entre elles, de pseudomorphoses d'anhydrite.

Au niveau de la Coast Road formation, plusieurs grandes phases de formation des tubes ont été mises en évidence : une phase d'injection de sédiments fluidisés syn-dépôt, une phase de lithification et autobrêchification interne des cheminées et enfin, une phase de cristallisation calcitique plus tardive.

Bailleul J., et al., 2007. *Journal of Sedimentary Research*, 77, 263-283.

Nyman S., et al., 2010. *Marine Geology*, 272, 319-336

## 2.6 Processus hydro-sédimentaires en domaine littoral (ASF)

### Responsables :

- Stéphane Abadie (SIAME, Anglet)  
stephane.abadie@univ-pau.fr
- Bruno Castelle (EPOC, Bordeaux)  
b.castelle@epoc.u-bordeaux1.fr

### Résumé :

Cette session accueillera les travaux relatifs à la dynamique de la côte sableuse ou rocheuse sur des échelles de temps allant de événementiel à l'échelle des tempêtes jusqu'aux évolutions pluri-annuelles. Elle couvre également les forçages et l'analyse physique des processus responsables de cette dynamique. On considérera donc favorablement les contributions sur les morphologies et leurs évolution, la dynamique du trait de côte ou le transport sédimentaire ainsi que les travaux relatifs aux vagues, à la submersion, aux courants littoraux, au vent et à l'impact de ces forçages sur la côte. La session est ouverte aux études à relativement grande échelle de temps et/ou d'espace ainsi qu'aux travaux dédiés plus particulièrement aux processus physiques fins couvrant des échelles de temps et d'espace plus réduites. Du point de vue méthodologique, elle comprend aussi bien les approches descriptives ou basées sur de l'observation ou de la mesure in-situ que les travaux de modélisation numériques ou théoriques. Cette session 2.6 est complémentaire de la session 1.3 dans laquelle seront traités en particulier les travaux couvrant la préservation des morphologies littorales dans l'archive géologique.

### 2.6.1 (o) Bed dynamics in a microtidal swash zone under small wave conditions

Damien Sous<sup>1</sup>, Adrien Lambert<sup>2</sup>, Vincent Rey<sup>1</sup>, Tathy Missamou<sup>1</sup>

<sup>1</sup>MIO, La Garde

<sup>2</sup>Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, Canada

The knowledge of the swash zone is of primary importance to understand the morphological evolution of sedimentary beaches. The swash zone is highly dynamic, with instantaneous sediment fluxes often being several orders of magnitude greater than their surf zone counterparts. Despite of the increased research efforts dedicated to the swash hydro- and morphodynamics during the last decades, several key processes remain to be understood before the swash morphodynamics can be predicted and modeled. A large part of existing studies have focused on meso to macrotidal swash zones exposed to moderate to storm wave conditions. The present communication reports on a field study of small-scale swash bed processes in microtidal and small wave conditions. It is shown that even such calm conditions can result in significantly dynamic swash zone. The selected field site is the Pont de Rousty sandy beach, Camargue, France. A high-resolution survey of the swash zone sand bed has been performed over a cross-shore transect on both hydro and morphodynamic aspects. The instrumentation included a set of both buried and non-buried pressure sensors, a network of ultrasonic altimeters, a 3D high resolution acoustic velocimeter and other pressure and velocity sensors deployed outside the swash zone to measure the incoming forcing. Results show that the swash bed and slope permanently evolve under the action of waves. Each swash event can individually induce bed level variations ranging from 1 to 5mm but larger cumulated evolution (up to 4cm) are observed at longer time scales. Ongoing work is focused, on one hand, to the role played by the swash physical parameters (velocity, duration, height, etc) on the event-related transport and, on the other hand, to the identification of a « bottom-up » relationship between the succession of individual actions of swash events and the long term evolution of swash morphology.

### 2.6.2 (o) Simulation de la dynamique des rides sous-marines par un automate cellulaire

Vincent Marieu<sup>1</sup>, Alexandre Tiliacos<sup>2</sup>, Romain Pinguet<sup>2</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Talence

<sup>2</sup>ENSEIRB-MATMECA, Talence

La dynamique des rides sous-marines est un phénomène non-linéaire complexe. La simuler par des moyens classiques implique la résolution des équations de Navier-Stokes, l'implémentation de formules de transport sédimentaire et la résolution de l'équation d'Exner pour l'évolution du fond. Ces modèles couplés sont nécessaires pour la description fine des processus clés de la dynamique des rides mais sont très coûteux en temps de calcul car l'hydrodynamique doit être résolue à chaque pas de temps morphodynamique. Ici, nous présentons une autre approche de modélisation basée sur un automate cellulaire. Le fonctionnement de chaque cellule est régi par des lois de comportement simples mais il conduit, à l'échelle de l'automate complet, à un fonctionnement macroscopique complexe. Ces modèles permettent d'obtenir rapidement des résultats en trois dimensions, avec des temps de calcul relativement courts. Les premiers résultats du modèle sont présentés, à savoir l'évolution de rides sous l'action d'un courant unidirectionnel, de vagues, ou de la conjonction de vagues et courant. Le modèle permet de simuler l'évolution d'un fond plat jusqu'à saturation, par des appariements successifs de rides, il est également capable de reproduire les formes particulières des rides en présence à la fois de houle et de courant. Cependant le modèle reste approximatif du point de vue quantitatif et un certain nombre de pistes doivent être exploitées pour recalibrer la physique du modèle.

### 2.6.3 (o) Mécanismes contrôlant la migration des embouchures tidales

Xavier Bertin<sup>1</sup>, Antoine Dumon<sup>1</sup>, Alphonse Nahon<sup>2</sup>, André Fortunato<sup>3</sup>, Eric Chaumillon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LIENSs, La Rochelle

<sup>2</sup>BRGM, Pessac

<sup>3</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal

Les lagunes et les embouchures méso-tidales présentent des enjeux socio-économiques très importants du fait de leur utilisation pour le développement d'activités portuaires, aquacoles et touristiques, mais aussi de la présence d'habitations sur le cordon dunaire, en dépit des risques d'érosion et de submersion. Ces systèmes côtiers sont caractérisés par une dynamique intense, en raison du régime méso-tidal auquel se superpose un régime d'agitation souvent énergétique, surtout en période hivernale. Parmi les évolutions morphologiques induites par cette forte dynamique, la migration des embouchures est un phénomène couramment observé et a par exemple motivé l'endiguement de nombreuses embouchures afin de fixer leur position. La migration des embouchures tidales est souvent expliquée par un modèle simple, où l'accumulation de sédiments au niveau de la rive située en amont de la dérive littorale provoque l'érosion de la rive opposée et donc la migration de l'embouchure dans le sens de la dérive littorale.

Cette étude fait la synthèse de travaux de recherche conduits au cours des dernières années en France et au Portugal et montre que la migration des embouchures tidales obéit à la combinaison de plusieurs mécanismes, qui peuvent même induire une migration dans le sens opposé à la dérive littorale. Parmi ces mécanismes, la circulation verticale induite dans les méandres provoque le développement d'une barre à l'intérieur du méandre et l'érosion de la rive située à l'extérieur. La migration du chenal qui résulte de ce phénomène peut dominer celle induite par la dérive littorale. Un déficit sédimentaire en amont de la dérive littorale peut également induire une migration dans le sens opposé à la dérive littorale. Ces mécanismes, déduits de l'analyse d'images satellite combinée à la modélisation numérique de la dérive littorale, sont en cours de vérification à l'aide d'un système de modélisation morphodynamique 3D intégrant les dernières théories de couplage entre les vagues et les courants.

### 2.6.4 (o) Propriétés statistiques des événements de tempête au large de la côte Basque

Stéphane Abadie<sup>1</sup>, Michael Gardner<sup>1</sup>, Philippe Maron<sup>1</sup>, Inaki De Santiago<sup>2</sup>, Denis Morichon<sup>1</sup>, Noëlle Bru<sup>3</sup>

<sup>1</sup>SIAME, Anglet

<sup>2</sup>AZTI, Herrera Kaia, Pasaia (Gipuzkoa), Espagne

<sup>3</sup>LMAP, Pau

Dans ce travail, nous proposons une étude statistique des vagues de tempête sur la côte basque française et espagnole à partir d'un jeu de données issu de simulations numériques. Ce jeu de données, hébergé sur le site des ports espagnols (Puertos del Estado), couvre la période 1958 à nos jours. Après avoir validé ces données en comparaison de nos propres mesures, nous avons fait apparaître les événements de tempêtes, définis comme les événements extrêmes en terme d'énergie totale (i.e. l'intégrale du flux entre le début et la fin de la tempête). Puis nous avons analysé statistiquement les données obtenues et déterminé une classification permettant de dégager des groupements représentatifs de ces événements de tempête. Nous cherchons ensuite à déterminer les tendances à l'augmentation ou non de ces épisodes de tempête. Enfin, une étude numérique est menée afin de caractériser la directionnalité des flux d'énergie lors de ces événements pour mieux comprendre les impacts à la côte.

### 2.6.5 (o) Impact des tempêtes sur une plage de poche partiellement aménagée

Denis Morichon<sup>1</sup>, Inaki De Santiago<sup>2</sup>, Stéphane Abadie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SIAME, Anglet

<sup>2</sup>AZTI Herrera Kaia, Pasaia (Gipuzkoa), Espagne

Le long du littoral basque, les plages sableuses se situent majoritairement en fond de baie. La plage de Zarautz, côté basque espagnol, constitue notre site d'étude. Il s'agit d'une plage de poche partiellement anthropisée de 2km de long. Ce site est équipé d'une station vidéo depuis 2010. Des levés topographiques, réalisés avant et après des événements de tempêtes, couplés avec l'acquisition d'images vidéo ont permis de mettre en évidence la complexité de la réponse morphologique de la plage. Afin de mieux comprendre le fonctionnement de ce type d'environnement, un modèle numérique, basé sur le code Xbeach, a été mis en place. Cette étude présente dans un premier temps la calibration et la validation du modèle. Les résultats des simulations sont ensuite analysés en mettant l'accent sur l'influence des ouvrages de protection et la variabilité des conditions de houle au large de la baie.

### 2.6.6 (o) Storm impact on the seasonal shoreline dynamics of a meso- macrotidal open sandy beach (Biscarrosse, France)

Nadia Senechal<sup>1</sup>, Giovanni Coco<sup>2</sup>, Bruno Castelle<sup>1</sup>, Vincent Marieu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Pessac

<sup>2</sup>IH Cantabria, University of Santander, Espagne

The study of sandy coasts has received vivid interest over the past decades because beaches are attractive environments that drive important economic development associated with tourism. Shoreline evolution can be variable over a wide range of different temporal and spatial scales and this is especially the case for swell-dominated environments. Various conceptual models describing the sequence of beach accretion and erosion have been developed over the years, among them the « storm-post-storm » model and the « bar-berm » model. The main difference between these two conceptual models lies in their intrinsic temporal scale. The « bar-berm » model is generally associated with areas showing an alternation of accretion and erosion over the seasonal temporal scale which is much larger than the time scale associated to a single « storm-post-storm » event.

The objective of this contribution is to investigate seasonal patterns of beach accretion and erosion and to evaluate the impact of storm intensity and occurrence on these seasonal patterns. Here, we use high-frequency shoreline positions extracted from video images over a 3 year period at Biscarrosse Beach for a variety of storm conditions, including both intense single storms and clusters of storms. Our results indicate that monthly-averaged wave conditions are not statistically different between the three years of survey ; a clear seasonality is observed in the offshore significant wave height and in the occurrence of « Winter storm ». Analysis of storm activity indicates that the number and intensity of storms is highly variable over the three years. However, the shoreline displays a stable position occurring in February and July, providing evidence of seasonal-recovery. Biscarrosse data show that rapid erosion can be observed also under moderate conditions and that beach recovery after the storm season can be relatively rapid.

### 2.6.7 (o) Dynamique à haute fréquence d'une barre d'avant-côte sous influence d'un atténuateur de vagues : suivi vidéo du Lido de Sète

Yann Balouin<sup>1</sup>, Yohan Colombet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM Languedoc-Roussillon, Montpellier

Les barres d'avant-côtes sont des morphologies dynamiques, qui jouent un rôle significatif sur l'évolution du littoral en atténuant les vagues de tempêtes et en constituant des stocks sédimentaires importants pour la résilience des plages. Le site du Lido de Sète est un système à double-barre : une barre externe quasi-rectiligne, et une barre interne en croissants. Le suivi depuis de nombreuses années a permis d'identifier un cycle de NOM (Net Offshore Migration) de ces barres. Plus récemment, un suivi à haute fréquence par vidéo ARGUS a mis en évidence une grande dynamique longitudinale de la barre interne pendant les tempêtes, y compris lors d'événements modérés. Selon l'incidence de la houle, les croissants migrent très rapidement, et pour les tempêtes les plus énergétiques, on observe une linéarisation de la barre qui ne retrouve ces croissants que quelques semaines après l'événement. Début 2013, dans le cadre de l'aménagement du Lido, un atténuateur de houle en géotextile de 850 m de long a été déployé parallèlement à la plage sur la barre externe. Ce tube de 3 m de haut est peu profond (1 m d'eau au-dessus du géotextile) et vise à faire déferler les vagues de tempêtes au large (450 m de la plage) tout en laissant passer les vagues plus constructives. Le suivi à haute fréquence de la barre interne depuis l'installation constitue retour d'expérience inédit afin de mieux comprendre les modifications de l'hydrodynamique et de la morphodynamique du littoral. Les résultats préliminaires mettent en évidence une modification comportementale importante. Le géotextile génère un filtrage de la houle dès lors que Hs atteint 1m. Si dans un premier temps, le tube n'a pas eu d'effet significatif sur la dynamique de la barre interne et du trait de côte, les tempêtes de l'automne 2013 ont en revanche fortement modifié l'avant-côte. La barre interne s'est linéarisée et a entamé une rotation qui tend à la rendre parallèle au géotextile et à éloigner de la côte. La zone adjacente, relativement stable ces dernières années, présente également des modifications : augmentation de la tridimensionnalité de la barre avec des conséquences sur la position du trait de côte et sur l'extension de la submersion de la plage lors des tempêtes. Ces résultats, bien que préliminaires fournissent un cas d'étude particulièrement pertinent pour mieux évaluer in-situ, les effets directs ou indirects d'un ouvrage de défense contre l'érosion.

### 2.6.8 (o) Un système de plage corallienne naturellement non-résilient à l'Hermitage, Ile de La Réunion

Ywenn De La Torre<sup>1</sup>, Eric Chateauminois<sup>2</sup>, Emmanuel Cordier<sup>3</sup>,  
 Isabelle Thinon<sup>4</sup>, Myriam Mahabol<sup>5</sup>,

<sup>1</sup>BRGM, Montpellier

<sup>2</sup>BRGM, St Denis

<sup>3</sup>Laboratoire GéoSciences Réunion, Université de La Réunion,  
 Saint-Denis

<sup>4</sup>BRGM, Orléans

<sup>5</sup>Institut de Recherche pour le Développement, Marseille

Si les perturbations de la résilience des systèmes-plage sont le plus souvent décrites comme étant d'origine anthropique, il existe certains environnements où, sans intervention de l'homme, cette résilience ne s'opère pas. Située dans le sud-ouest de l'océan Indien, La Réunion est une île volcanique jeune où les formations coralliennes sont présentes au stade de récif frangeant essentiellement sur la partie ouest, sous le vent. Comprise dans la Réserve Marine de La Réunion et principal site balnéaire de l'île, la plage de l'Hermitage concentre les enjeux en termes de patrimoine naturel mais aussi économique et touristique. Or, cette plage est aujourd'hui menacée car sujette à une érosion importante. L'abaissement du profil atteint localement 2m d'altitude depuis les années 1970. Cette érosion se concentre à proximité de la passe qui joue un rôle important sur la dynamique sédimentaire de la plage. Lors

des épisodes de tempête australe ou de cyclone, le jet de rive atteint le haut de plage. Le matériel sédimentaire est transporté dans la dépression d'arrière-récif en direction de la passe pour être vidangé au-devant de du front récifal. Le suivi de la plage indique que les apports longitudinaux ne compensent pas les pertes vers la passe. Lors des périodes de houle constructive, le récif frangeant empêche le retour sur la plage du sable prélevé initialement et le sable se stocke sur le plateau insulaire sous la forme de mégarides.

Le récif frangeant joue donc un rôle d'atténuateur de houle, ce qui limite l'érosion, mais aussi un rôle de limitation de l'accrétion en empêchant le retour du sable sur la plage. Privée ainsi de résilience, la plage de l'Hermitage est donc vouée à disparaître « naturellement » sous l'effet des tempêtes et de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique. Des mesures de rechargement pourraient toutefois être engagées en utilisant le sable des mégarides, mais la Réserve Marine proscrit ce type d'intervention.

### 2.6.9 (o) Influence de la migration longitudinale des barres d'avant-côte dans le processus de Net Offshore Migration

Nicolas Aleman<sup>1</sup>, Raphaël Certain<sup>1</sup>, Nicolas Robin<sup>1</sup>, Jean-Paul Barusseau<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEFREM, Perpignan

Les systèmes de barres multiples sont souvent l'objet de cycles de migration résiduelle vers le large (Net Offshore Migration, NOM). Les barres apparaissent près de la côte et migrent ensuite vers le large où elles dégènèrent. Ce comportement cyclique est principalement décrit comme le résultat d'une redistribution transversale des sédiments en réponse aux conditions d'agitation avec une uniformité longitudinale. Ainsi, le mouvement de la barre est généralement considéré comme essentiellement transversal. Notre étude vise à analyser la morphodynamique pluri-décennales de barres d'avant-côte légèrement obliques et leur implication dans le processus de NOM. Une plage à barres d'avant-côte a été étudiée dans le golfe du Lion. Cette étude est basée sur un vaste jeu de données possédant une grande extension longitudinale (LiDAR topo-bathymétrique 3D, photographies aériennes 2DH et profils bathymétriques 2DV).

L'imagerie LiDAR 2009 a permis l'identification et la description complète de barres d'avant-côte légèrement obliques (angle d'environ 2°) ayant une extension longitudinale pluri-kilométrique. Une même barre est dans différents stades de maturation selon son extension longitudinale depuis son origine près de la côte jusqu'à sa dégénérescence au large. À l'échelle pluri-décennale, on observe une apparente migration longitudinale des barres en sens inverse du courant de dérive littorale dominant. Cette migration se traduit par l'observation de la NOM sur les profils bathymétriques 2DV. Par ailleurs, l'analyse de données bathymétriques et d'imageries satellites révèle que ce type de barres est courant sur les plages à barres à travers le monde, même s'il n'a pas été décrit en tant que tel. Ainsi, nos résultats sont de première importance pour les chercheurs en morphodynamique littorale et doivent à l'avenir être pris en compte lors d'études tant de terrain que de modélisation concernant le NOM.

### 2.6.10 (o) Etude pluriannuelle de la morphodynamique d'une plage de poche macrotidale

France Floch<sup>h1</sup>, Nicolas Le Dantec<sup>1,2</sup>, Anne Deschamps<sup>1</sup>, Klervi Hamon<sup>1</sup>, Serge Suanez<sup>3</sup>, Véronique Cuq<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LDO, Plouzané

<sup>2</sup>CEREMA, Margny Lès Compiègne

<sup>3</sup>LETG, Plouzané

Les littoraux, et plus particulièrement les plages sableuses, sont des environnements dynamiques en constante évolution. Leur morphologie évolue continuellement sous l'effet de forçages hydrodynamiques. On s'intéresse dans le cadre de ce projet à la morphodynamique d'une plage de poche macrotidale (la plage de Porsmilin, Finistère) à l'échelle pluriannuelle. Le profil de la plage est mesuré mensuellement depuis 2003. Une modélisation semi-empirique couplant les méthodes de Yates et Davidson permet d'identifier les profils d'équilibre de la plage suivant l'intensité de la houle. Une analyse factorielle unidimensionnelle est réalisée dans le but d'identifier les caractères morphologiques de la plage, leur comportement cyclique et leur variabilité spatiale. Outre les cycles érosion/accrétion saisonniers habituels, des cycles pluriannuels sont mis en évidence. Cette étude constitue une étape préliminaire aux travaux de modélisation effectués à partir des mesures multitemporelles entrepris sur différents types de plages bretonnes et qui nous permettront de mieux comprendre la dynamique des plages de poche.

### 2.6.11 (o) Evolution pluri-annuelle du trait de côte de la plage du Truc Vert (Aquitaine)

Bruno Castelle<sup>1</sup>, Vincent Marieu<sup>1</sup>, Stéphane Bujan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Pessac

Un modèle d'équilibre dynamique du trait de côte est développé et appliqué avec succès à la plage méso- macro-tidale du Truc Vert (Aquitaine). Après entraînement avec les données mensuelles à bimensuelles du trait de côte sur cette plage, le modèle permet de simuler avec fidélité l'évolution du trait de côte entre 2005 et 2013 avec des temps de calcul très faibles.

Le modèle montre que le meilleur proxy du trait de côte sur cette plage complexe est le niveau moyen des hautes mers, ce qui a des implications importantes notamment pour le suivi par imagerie vidéo. Volontairement simplifiée et robuste, cette approche de modélisation basée sur des lois de comportement permet également d'expliquer pourquoi les premières tempêtes d'hiver ont un impact plus important sur l'érosion que les suivantes. En effet, l'écart entre l'énergie des premières tempêtes et l'énergie d'équilibre est le plus grand en début d'hiver. Un autre résultat important est que, alors que les processus cross-shore étaient supposés impacter la variabilité du trait de côte sur des échelles de temps courtes (i.e. à l'échelle d'une tempête jusqu'à l'échelle saisonnière), ceux-ci cascaded vers les grandes échelles et permettent d'expliquer les variabilités de la position du trait de côte à l'échelle pluriannuelle.

Le modèle est ensuite appliqué à l'hiver 2013-2014 pendant lequel la plage du Truc Vert a été exposée à des vagues extrêmes. Le modèle permet de reproduire l'érosion de la plage du Truc Vert, mais ne permet pas de simuler celle-ci si on considère comme proxy du trait de côte le pied de dune. Une analyse du levé du trait de côte (proxy pied de dune) tout le long du littoral girondin entre la flèche du Cap Ferret et Soulac (110 km de côte environ) indique (1) une forte variabilité des taux d'érosion et de la hauteur de la falaise dunaire et (2) la présence d'oscillations du trait de côte avec des longueurs d'onde de O(1 km). Ces constats ouvrent de nombreuses perspectives de recherche.

### 2.6.12 (o) Morphodynamique saisonnière à pluri-décennale d'un banc de sable estuarien, la Longe de Boyard, intégrant l'hétérogénéité granulométrique du sédiment

Thomas Guerin<sup>1</sup>, Eric Chaumillon<sup>1</sup>, Xavier Bertin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LIENSs, Université de La Rochelle

Afin de mieux comprendre les processus physiques qui contrôlent l'évolution des formes côtières sableuses et de leur enregistrement stratigraphique, nous utilisons la modélisation morphodynamique 2DH sur des échelles saisonnières à pluri-décennales.

Le système de modélisation morphodynamique utilisé couple le module de circulation hydrodynamique SELFE (Zhang and Batista, 2008a), le module de vagues WWM-II (Roland et al., 2012), et le module de transport sédimentaire et d'évolution du fond SED2D (Dodet, 2013). Contrairement aux simulations morphodynamiques à long terme classiques qui reposent sur des forçages simplifiés (e.g. Cayocca, 2001), le modèle utilisé ici considère des forçages de marée et de vagues réalistes, le forçage de vagues étant obtenu à partir des ré-analyses de vent NCEP des dernières décennies. De plus, afin de réaliser des simulations plus proches de la réalité, nous intégrons une approche « multi-classe multi-couche » (Reniers et al., 2013) qui considère le fond sédimentaire comme constitué de grains de sable de différentes tailles, empilés sur plusieurs couches parallèles distinctes.

Ce modèle est appliqué au cas d'un banc de sable estuarien, la Longe de Boyard (Charente-Maritime), montrant une morphologie lobée dominée par le flot. Par rapport à une approche à granularité constante, des vitesses d'évolution morphologique plus faibles et plus proches de celles mesurées sont obtenues avec l'approche multi-classe multi-couche. Le modèle a également permis d'évaluer la contribution des vagues dans les évolutions de ce banc de sable estuarien. La prise en compte des vagues et de leur caractère asymétrique permet notamment d'obtenir un transport résiduel de flot sur la face océanique du banc, ce qui explique son alimentation par les sédiments du large.

### 2.6.13 (p) « Affouillement » grande échelle autour d'une perche cylindrique en zone de swash

Gaël Arnaud<sup>1,2</sup>, Stéphane Abadie<sup>1</sup>, Denis Morichon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SIAME, Anglet  
<sup>2</sup>LIENSs, La Rochelle

Nous présentons dans cette étude des résultats provenant de deux campagnes de mesure en zone intertidale réalisées successivement au Truc Vert en Gironde et à Zarautz au Pays Basque Espagnol. Durant ces campagnes, des mesures du niveau local du lit sédimentaire ont été réalisées à l'aide de perches résistives (Cassen et al., 2004). Les données de la perche permettent également de suivre l'évolution de la surface libre en temps réel.

Ces mesures montrent l'apparition récurrente de cycle érosion/accréation du lit en opposition de phase avec le signal de niveau d'eau. L'érosion débute lorsque la perche se trouve en zone de jet de rive, elle augmente graduellement jusqu'à atteindre une profondeur comprise entre 15 et 30 cm, et stoppe lorsque le niveau d'eau devient trop important. Lorsque la marée redescend, et de nouveau sous l'action du jet de rive, le cycle inverse est observé avec un retour du niveau du fond à sa valeur initiale. L'observation de la zone durant les mesures avec prise de vue, montre que cette érosion est associée à un affouillement grande échelle entourant la perche sur un diamètre de l'ordre du mètre. L'analyse de la littérature scientifique relative à l'affouillement montre que les formules d'estimation sont de manière générale limitées à des nombres de Froude

sous-critiques. Si on se base sur ces formules, la profondeur d'affouillement serait limitée à environ deux fois le diamètre de la perche alors que nos mesures font état de valeurs bien supérieures (jusqu'à 7 fois le diamètre).

Notre interprétation est que cet affouillement est généré par l'écoulement supercritique associé au jet de rive et déjà mis en évidence dans des études précédentes. Ce type d'écoulement peut donner naissance à des ondes de sable (antidunes, etc.). Nous pensons que la perche génère localement les conditions favorables à l'apparition d'une structure sédimentaire particulière appelée chute-and-pool dont les dimensions correspondent à nos mesures. S'adaptant quasi-instantanément à l'écoulement, cette structure sédimentaire grandit puis se fige à marée haute pour ensuite diminuer et enfin disparaître progressivement à la marée descendante, lorsque l'écoulement de jet de rive devient plus lent.

### 2.6.14 (p) Transferts sédimentaires littoraux : analyse des conditions hydrodynamiques et sédimentaires littorales sur la plage réflexive à terrasse de Grand Popo (Bénin, Golfe de Guinée)

France Floc'h<sup>1</sup>, Kodjo Aziayibor<sup>2</sup>, Rafael Almar<sup>3</sup>, Yves Du Penhoat<sup>3</sup>, Jean-Pierre Lefebvre<sup>3</sup>, Matthieu Dorel<sup>3</sup>, Georges Degbe<sup>4</sup>, Zacharie Sohou<sup>4</sup>, Christian Adje<sup>4</sup>, Norbert Hounkonnou<sup>2</sup>, Toussaint Okey<sup>2</sup>, Raoul Laibi<sup>5</sup>, Gregoire Abessolo<sup>6</sup>, Philippe Grandjean<sup>7</sup>, Timothy Scott<sup>8</sup>, Bruno Castelle<sup>9</sup>, Nadia Senechal<sup>9</sup>, Guillaume Detandt<sup>9</sup>, Wahab Laryea<sup>10</sup>, Donatus Angnuureng<sup>11</sup>, Edward Anthony<sup>12</sup>

<sup>1</sup>LDO, Plouzané

<sup>2</sup>ICMPA-UNESCO, Chair Cotonou, Bénin

<sup>3</sup>LEGOS, Toulouse

<sup>4</sup>IRHOB, Cotonou, Bénin

<sup>5</sup>Université Abomey Calavi, Cotonou, Bénin

<sup>6</sup>Université Douala, Cameroun

<sup>7</sup>Université Lyon1, Lyon

<sup>8</sup>Université Plymouth, Royaume-Uni

<sup>9</sup>EPOC, Talence

<sup>10</sup>Université Ghana, Accra, Ghana

<sup>11</sup>EPOC/Univ. Ghana, Talence

<sup>12</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

La bande côtière du Golfe de Guinée est actuellement soumise à une pression sociétale croissante (développement économique et urbain) et à une forte vulnérabilité naturelle aux aléas climatiques. Les houles longues énergétiques générées en Atlantique Sud sont le moteur d'une des plus importantes dérives littorales au monde, d'Ouest en Est. La construction de digues portuaires le long de ce littoral, au Ghana, Togo et Bénin perturbe l'équilibre naturel du système et provoque des érosions extrêmes de l'ordre de 10 m/an. Une étude est actuellement menée sur la côte béninoise afin de comprendre la dynamique du système littoral, de prévoir et d'anticiper les risques pour les populations et les infrastructures. Dans le cadre de cette étude, une campagne de mesures intensives a été menée à Grand Popo du 10 au 19 mars 2014. Un grand nombre de paramètres à la fois hydrodynamiques (vagues, courants, marée, "swash" ou jet de rive), sédimentaires (turbidité, distribution granulométrique, porosité) et morphologiques (bathymétrie, évolution topographique) ont été mesurés. En particulier, un ADCP WHS 1200 kHz (Acoustic Doppler Current Profiler) et une sonde multiparamètre (YSI) muni d'un capteur de turbidité ont été déployés au-delà de la zone de déferlement, à 12 m de fond. L'objectif de cette mesure est de connaître le forçage hydrodynamique en entrée du domaine littoral ainsi que les flux sédimentaires. Durant la campagne, les conditions de houles et de marée ont été très variées, offrant une grande diversité de forçage du système littoral.

Une analyse a été menée sur l'influence des conditions hydrodynamiques rencontrées (houles longues lointaines, courtes générées dans le Golfe de Guinée, différentes incidences de la houle, marée de vives et mortes eaux, vent) sur les flux sédimentaires afin d'appréhender l'origine de la morphodynamique observée. Les données de houle et de courant obtenues par ADCP ont été comparées à la rétrodiffusion acoustique du courantomètre en termes de turbidité, en corrélant les données acquises via le turbidimètre co-localisé avec l'ADCP. Les paramètres influençant la remise en suspension des sédiments ont été identifiés. Ces flux sédimentaires ont finalement été reliés aux phases d'érosion/accrétion observées en bas/haut de plage.

### 2.6.15 (p) Field study of cross-reef dynamics above the Ouano coral barrier, New Caledonia, France

Damien Sous<sup>1</sup>, Jérôme Aucan<sup>2</sup>, Jean Blanchot<sup>1</sup>, Jean-Luc Devenon<sup>1</sup>, Marc Pagano<sup>1</sup>, Vincent Rey<sup>1</sup>, Gilles Rougier<sup>1</sup>, Cristele Chevalier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>MIO, La Garde

<sup>2</sup>LEGOS NOUMEA, Noumea, Nouvelle-Calédonie

Mostly present in tropical regions, coral reefs both provide a unique habitat for a wide variety of living organisms and very efficient protection against ocean action on nearshore and lagoon areas. Recent tsunamis and cyclones events demonstrated that the weakening of coral barriers can have tremendous consequences on nearshore areas, including submersion, erosion and overwash deposit.

The present field work aims to study the hydrodynamic processes over a reef barrier, focusing in particular of the offshore wave energy transmission toward the lagoon. The selected field site is the Ouano lagoon, New Caledonia, France. A three-months survey has been performed from september to november 2013 including wave measurements by pressure sensors at the outside reef, above the reef flat and inside the lagoon and velocity profiles measurements at selected places inside the lagoon. During the studied season, the reef is permanently exposed to long swell waves with significant wave height ranging from 0.4 to 2.7m.

The wave energy over the reef flat is mostly controlled by the tidal elevation rather than by the incoming swell energy : the higher the mean level, the stronger the wave energy. Significant energy transfers toward low frequencies occur modulated by the tidal elevation. From mid to high tide, the energy transfer during wave breaking is dominant and the wave dynamics over the reef is focused in the infragravity band. From mid to low tide, the contribution of friction processes increases as the mean level decreases. Cross-reef current measurements show that the fluxes are overwhelmingly directed toward the lagoon. Few and short events of outflow are observed during the smallest swell periods either at high tide or at the beginning of rising tide. For small swells, the cross-reef current is modulated by the tidal elevation, while for large incoming waves the fluxes are much stronger (up to 40cm/s) and nearly constant.

### 2.6.16 (p) Microtextures on quartz grains deposited by an extreme marine inundation in Tahaddart lowland, Tangier coast, Morocco

Hajar El Talibi<sup>1</sup>, Said El Moussaoui<sup>1</sup>, Mohamed Najib Zaghoul<sup>1</sup>, Khadija Aboumaria<sup>1</sup>, Patrick Wassmer<sup>2</sup>, Jean-Luc Mercier<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, Maroc

<sup>2</sup>Laboratoire de géographie physique, Meudon

<sup>3</sup>Faculté de Géographie et d'Aménagement, université de Strasbourg

Extreme marine inundations triggered by tsunami or storms have an undoubtedly important significance for studies on coastal evolution

and coastal management. Tsunamis can leave sedimentary imprints on shores far from the event source, the recognition of coastal inundations depends on the identification of characteristic ancient deposits and the stratigraphical record can provide crucial information on recurrence and patterns of coastal flooding and/or specificities of a particular event. A sedimentary deposit evidencing a strong energy flooding event, founded in the Tahaddart lowland (South coast of Tangier, Morocco) and attribute to the AD 1755 event, was studied using a scanning electron microscope (SEM). On the basis of different microtextures (e.g. grooves, precipitation/dissolution, marks, fractures, roundness....), sand particles were analyzed and compared with grains of possible sources in coastal dunes in order to identify their provenance. The microtextural analysis shows that the sand particles presented high angularity, very high results for fresh surfaces and the highest value for percussion marks. Furthermore, the grains deposited by this event are characterized by source-inherited features and we suggest that coastal foredunes may have been a relevant source.

## 2.7 Dépôt, authigenèse et diagenèse des sédiments riches en matière organique : l’empreinte biogéochimique de l’activité des micro-organismes (ASF)

(Sedimentation, authigenesis and diagenesis of organic-matter-rich deposits : biogeochemical imprint of microbial activity) (ASF)

### Responsables :

- Nicolas Tribovillard (Géosystèmes, Lille)  
Nicolas.Tribovillard@univ-lille1.fr
- Swanne Gontharet (LOG, ULCO)  
swanne.gontharet@univ-littoral.fr
- Kevin Lepot (Géosystèmes, Lille)  
Kevin.Lepot@univ-lille1.fr

### Résumé :

Les sédiments riches en matière organique, marins ou lacustres, sont porteurs d’informations paléo-environnementales sur le niveau trophique du milieu marin ou lacustre, ainsi que sur l’état de ventilation de la colonne d’eau, ou de l’oxygénation des fonds du milieu de dépôt, sans négliger l’influence paléoclimatique sur la nature des dépôts organiques. Simultanément, ces sédiments sont des milieux favorables à la vie des micro-organismes (an-)aérobies. L’activité de ces derniers est susceptible de retentir fortement sur la composition chimique et minéralogique des sédiments hôtes : précipitations minérales précoces (carbonates, sulfures, phosphates, voire (phyllo-) silicates) et composition chimique du cortège d’éléments majeurs, mineurs et traces. Il importe d’être capable de distinguer le signal initial du signal diagénétique pour optimiser l’interprétation des conditions paléoenvironnementales sensu lato des sédiments lacustres ou marins.

Cette session se propose d’avancer dans cette compréhension, par l’étude de paléoenvironnements particuliers, ou de certaines tranches stratigraphiques de l’histoire de la planète (en incluant notamment les temps protérozoïques marqués par l’émergence de la vie marine unicellulaire) ou encore par l’étude de mécanismes biogéochimiques, en incluant les processus observés aux sites de suintement hydrothermaux chauds ou froids. Ce ne sont là que quelques pistes car le champ thématique de cette session est plus vaste encore. Cette session se veut l’occasion de mêler des chercheurs qui ne se croisent pas souvent, dans ce "creuset" biogéochimique des sédiments de tous âges et toutes origines, déposés dans des contextes favorisant l’accumulation de la matière organique et l’activité des micro-organismes.

### 2.7.1 (o) Dépôt, authigenèse et diagenèse du phosphore associé aux oxydes de fer dans les (paléo)environnements marins

Pierre Anschutz<sup>1</sup>, Céline Charbonnier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Pessac

Le phosphore est le nutriment qui contrôle la productivité biologique à l'échelle des temps géologique. Le phosphore inorganique dissous peut être incorporé dans la matière organique ou être adsorbé sur des particules minérales. La libération de P de la matière organique lié à la respiration bactérienne induit un recyclage du P qui peut redevenir biodisponible ou être stocké dans des phases minérales tels que les oxyhydroxydes de Fe ou Al, ou des phosphates authigéniques ou biogéniques. L'adsorption de P sur les oxydes de Fe a été abondamment étudiée parce que le P est un nutriment limitant dans les écosystèmes continentaux et marins. Les échanges entre les sédiments et l'eau surnageante se produisent suite à des processus biogéochimiques benthiques parmi lesquels la minéralisation du P-organique, le cycle rédox du fer et le flux benthique du P. Une partie du P des eaux interstitielles issu de la minéralisation de la matière organique peut être adsorbé sur les oxyhydroxydes de fer dans la couche oxydée des sédiments. Quand les oxydes de fer sont advectés dans la zone anoxique des sédiments en raison de l'enfouissement, la partie la plus réductible des phases Fe(III) est réduite et solubilisée, induisant une libération du P. Finalement, P peut être enfouis à long terme sous la forme de P-organique fossile, des oxydes de fer réfractaires ou de l'apatite. Ainsi, le P associé à Fe(III) représente généralement un puits initial du P sédimentaire issu de la matière organique, mais pas un puits final majeur. Nous présentons ici une compilation de données sur les relations Fe-P dans grand nombre de sédiments marins modernes : Des environnement côtiers, des sédiments des marges continentales, de zone oligotrophes et d'OMZ, des sédiments hydrothermaux et des enregistrements sédimentaires du Quaternaire. Dans tous ces cas, les particules ferriques dont les sites d'adsorption sont saturés en P ont un rapport Fe :P qui se situe dans une gamme très restreinte de 10±6. Cette compilation montre un comportement global des capacités d'adsorption du P par les oxydes de Fe. L'homogénéité du rapport Fe :P dans tous ces environnements permet de mieux comprendre la biogéochimie du P depuis l'archéen jusqu'à nos jours.

### 2.7.2 (o) Interactions entre tectonique synsédimentaire, échappement de fluides et carbonates authigéniques dans le Jurassique supérieur du Boulonnais (France)

Nicolas Tribouvillard<sup>1</sup>, Olivier Averbuch<sup>1</sup>, Ebraheem Hatem<sup>1</sup>, François Guillot<sup>1</sup>, Jean-Luc Potdevin<sup>1</sup>, Pierre Sans Jofre<sup>2</sup>, Florent Barbecot<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Géosystèmes, Lille

<sup>2</sup>LDO, Plouzané

<sup>3</sup>UQUAM, Montréal, Canada

Le Jurassique supérieur du Boulonnais (affleurant le long des côtes entre Boulogne/mer et le Cap Gris Nez) s'est mis en place dans un contexte de rampe dominée par les apports terrigéniques. Néanmoins des objets carbonatés existent au sein de ces environnements clastiques. Certains d'entre eux ne sont pas issus du dépôt « simple » de carbonates : il s'agit des bancs carbonatés microsparitiques de la formation marseuse des Bancs Jumeaux d'une part et, d'autre part, de petits récifs à huîtres monospécifiques et à matrice micritique. La signature isotopique des carbonates de ces objets indique une source de carbone léger, issu de la dégradation de la matière organique dans un environnement propice à la sulfato-réduction bactérienne. De plus, la localisation bien spécifique de

ces objets dans la colonne stratigraphique suggère que les fluides porteurs de carbone isotopiquement léger, qui ont provoqué la formation des calcaires authigéniques, aient été libérés à l'occasion de mouvements tectoniques synsédimentaires. Cette dynamique authigène semble s'être produite lors d'épisodes d'approfondissement accélérés du bassin, peut-être en relation avec l'extension qui affectait cette région, induite par l'ouverture du rift atlantique.

### 2.7.3 (o) Palaeoenvironmental reconstruction of a Cretaceous black shale from microbial palaeoecology

Muriel Pacton<sup>1</sup>, Philippe Sorrel<sup>1</sup>, Philippe Schaeffer<sup>2</sup>, Vincent Grossi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LGLTPE, Lyon

<sup>2</sup>Laboratoire de Biogéochimie Moléculaire, Université de Strasbourg

The Urbino Level is a black shale interval that records in Italy an Albian regional oceanic anoxic event (referred thereafter to OAE1b). It is characterized by high organic carbon burial induced by enhanced runoff along with an increase in surface-water temperatures in restricted basins of the western Tethys. Such environmental conditions favoured the preservation of sedimentary organic matter (SOM). This study focuses on the characterization of organic matter (OM) present in organic-rich sediments from the OAE 1b level of Monte Petrano and Poggio le Guaine sections (Central Italy) using microscopic (transmission electron microscopy -TEM-), spectroscopic (micro-Raman spectroscopy) and geochemical (lipid biomarkers and X-ray fluorescence) approaches. The optical study of OM present in the rock was performed after the destruction of the mineral fraction through HCl and HF treatments, whereas geochemical analyses were carried out on bulk rock samples.

TEM observations revealed the presence of well-preserved bacterial bodies embedded in extracellular polymeric substances (EPS). Contamination was excluded through proper sampling procedures and micro-Raman spectroscopy analyses. Checking for recent contamination was carried out on the palynological residue (OM) using 14C AMS (Accelerator Mass Spectroscopy) dating. Intracellular components were identified as polyphosphate granules and carotenoids using correlated micro-Raman-TEM imaging and spectroscopy analyses. These observations suggest the development of denitrifying bacteria in a slightly acidic photic zone during the deposition of OAE1b organic-rich sediments.

We propose that the microbial biomass produced in a photic chemocline deposited under anoxic and deep water conditions, which allowed a better preservation of biological structures and biomolecules. Our results further suggest that packaging of microbial bodies in EPS may constitute an efficient pathway for their preservation during OM sedimentation.

### 2.7.4 (o) Empreintes du métabolisme de la matière organique sur les enregistrements sédimentaires dans l'océan Arctique

Charles Gobeil<sup>1</sup>

<sup>1</sup> INRS - Eau Terre Environnement, Quebec, Canada

Les profils d'éléments formant des phases authigènes au cours des stades précoces du métabolisme de la matière organique dans les sédiments furent déterminés dans une trentaine de carottes courtes (40 cm) de la marge continentale et des bassins abyssaux de l'océan Arctique. Au cours de cet exposé, une attention particulière sera accordée au Fe qui précipite notamment dans les sédiments sous formes d'oxyhydroxydes, de monosulfure et de pyrite. Les tendances les plus typiques

des enregistrements sédimentaires de ces formes de Fe obtenues par lixiviation seront décrites et interprétées en lien avec les variations présumées du flux de carbone organique à l'interface eau-sédiment. Un bilan de l'accumulation totale du Fe authigène à l'échelle de l'océan Arctique sera en outre proposé.

### 2.7.5 (o) Implications of bacterial activity in the recorded $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in carbonates during a passive biomineralisation

Caroline Thaler<sup>1</sup>, Giovanni Aloisi<sup>2</sup>, Magali Ader<sup>1</sup>, François Guyot<sup>3</sup>,  
 Bénédicte Ménez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG PARIS

<sup>2</sup>LOCEAN, Paris

<sup>3</sup>Laboratoire de Cosmochimie et de Minéralogie du Muséum National  
 d'Histoire Naturelle, Paris

Oxygen and Carbon isotopes measurements are frequently used to investigate carbonate precipitation in diagenetic sedimentary environments. Since microbial ecosystems have been found in these environments, they are increasingly recognized to exert a strong influence on carbonate precipitation. Microorganisms are thus likely to influence both carbon and oxygen isotope composition of diagenetic carbonates. To investigate this possibility, we performed bacterial biomineralisation experiments, monitoring the evolution of classical chemical parameter as well as oxygen and carbon isotopic compositions of DIC, water, organic matter and solid carbonates.

The biomineralisations were performed by *Sporosarcina pasteurii* a soil ureolytic bacteria producing  $\text{H}_2\text{CO}_3$  and  $\text{NH}_3$  that uptakes a proton forming  $\text{NH}_4^+$ . The resulting pH increase lead to the precipitation of  $\text{CaCO}_3$ . Four experiments were run in fairly similar conditions (temperature, solution composition, initial pH) except for 2 parameters : First the kinetic of the ureolysis varied among experiments, secondly, in two experiments, we add carbonic anhydrase (CA) an enzyme able to accelerate oxygen isotope equilibration between DIC species and water. It gave final  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CaCO}_3}$ , with more than 3‰ in differences between experiments, and cases of fractionation between  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CaCO}_3}$  of 10‰.

To interpret these results we developed a closed-system box model that accounts for the above biochemical processes and simulates the kinetic behavior of chemical and isotopic species in the DIC system. It showed that the the variable  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CaCO}_3}$  can be explained by variations in the ureolysis kinetic and that carbonate precipitation occurred at equilibrium for carbon isotopes.

When DIC equilibration was non-catalyzed by CA, solid carbonates precipitated with a negative offset from oxygen isotopic equilibrium of almost 20‰. In the presence of CA,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3}$  finally reached the equilibrium. Thus the 20‰ offset was due to a disequilibrium of oxygen isotopes between the metabolic DIC and water.

In our experiments as probably in diagenetic environments associated to microbial life, if the DIC is at least partially produced by living organism, the metabolic activity can impact both  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of solid carbonates.

### 2.7.6 (o) Barite equilibrium in marine sediments from the entire IODP porewater composition data base

Guilhem Hoareau<sup>1,2</sup>, Christophe Monnin<sup>2</sup>, Francis Odonne<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau

<sup>2</sup>GET, Toulouse

Barite ( $\text{BaSO}_4$ ) is the main solid phase carrying barium in the marine environment. "Biogenic" barite rains down to the seafloor where it contributes to the Ba concentration in oceanic sediments. This deposited barite is then commonly used as a record of past productivity or the isotopic composition of seawater through geological times, based on the assumption of weak solubility and resistance to dissolution during burial. However, in environments of extensive microbial sulfate reduction, barite may dissolve leading to Ba remobilization in sediments, thus erasing any record of productivity. An upward barium flux and a downward sulfate flux can be generated, leading to authigenic barite precipitation (« barite fronts »). Barite observations show that the behavior of barium in marine sediments is very dynamic and is controlled for the most part by barite dissolution and precipitation. This behavior can itself be used to model the dynamics of microbially-mediated diagenetic reactions. For this purpose, one of the first questions to address is that of the equilibrium state of the barite dissolution reaction. How far is the system from equilibrium, either on the dissolution side (how undersaturated the porewaters are) or on the supersaturation side (what is the supersaturation level reached by barite in sediment porewaters) ?

In the present work we investigate the saturation state of marine sediment porewaters through the calculation of the barium sulfate saturation index for the entire IODP porewater composition data base. We address several questions : assess the data quality, depict the data scatter, illustrate the Ba concentration range encountered in marine sediment porewaters, look for zones of undersaturation and supersaturation linked to the barium dynamics in the marine environment, as well as delimitate the conditions needed for barite equilibrium.

### 2.7.7 (p) Caractérisation sédimentaire d'une roche mère carbonatée du Bassin aquitain : exemple de la formation Parnac du Quercy

Laura Bastianini<sup>1,2</sup>, Guilhem Hoareau<sup>2</sup>, Bruno Caline<sup>1</sup>, Laurent Guy<sup>1</sup>,  
 Mathieu Martinez<sup>1</sup>, François Baudin<sup>3</sup>, Cédric Bonnel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>2</sup>LFC-R, Pau

<sup>3</sup>ISTeP, Paris

Le Bassin d'Aquitaine, première province pétrolière française, est comblé par des dépôts couvrant le Trias à l'actuel. La majorité des hydrocarbures actuellement exploitée a été produite par des roches mères marno-calcaires marines du Kimméridgien supérieur correspondant localement aux formations de Lons (Béarn) et de Parnac (Quercy).

Afin de caractériser l'environnement de dépôt de ces formations roches mères et de définir les variations latérales de faciès, une étude intégrant des analyses sédimentologiques, minéralogiques et géochimiques a été réalisée sur des affleurements dans le Quercy (coupe de Crayssac).

Des résultats préliminaires nous apportent plusieurs informations :

- L'analyse par pyrolyse Rock-Eval met en évidence la présence de faciès carbonatés riches en kérogènes de type II immatures (jusqu'à 14% de carbone organique total).
- Les données de DRX montrent que les échantillons prélevés sont essentiellement constitués de calcite, tandis que la calcimétrie indique des taux de  $\text{CaCO}_3$  variant de 70 à 99%.

Des données supplémentaires de mesure de la réflectance de la vitrinite sur les échantillons roches mères ainsi que l'examen de lames minces au microscope optique et des échantillons au MEB sont en cours de traitement.

Cette étude permettra de préciser les relations qui existent entre les paramètres sédimentaires (stratigraphie, faciès de dépôt, diagénèse) et la présence de matière organique dans les roches étudiées. En outre, ce travail sera utilisé pour comparer les séries roches mères du Bassin d'Aquitaine avec celles du même âge au Moyen-Orient (Formation Diyab).

### 2.7.8 (p) Présence de tourbe dans la plate-forme continentale sud-brésilienne

Iran Carlos Stalliviere Corrêa<sup>1</sup>, Jair Weschenfelder<sup>1</sup>, Elírio Ernestino Toldo Jr.<sup>1</sup>, Ricardo Baitelli<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, Brésil

Cette étude caractérise la présence de tourbe dans la plate-forme continentale du sud du Brésil à une profondeur de 60m en dessous de la mer actuelle. Les échantillons correspondent à la carotte T-27 obtenue pendant l'opération océanographique GEOMAR VII. L'analyse de la taille des particules de sédiments, la palynofaciologie et la datation de la tourbe, ont été effectués. La présence de matière carbonée dans ce domaine, c'est la indication de la présence de zones humides d'eau douce ou d'eau saumâtre pendant les période glacial de niveau de la mer plus bas qu'aujourd'hui. Avec la transgression du niveau de la mer, ces zones ont été complètement inondées et ont laissé vestiges de cette ancienne dépôts, comme les accumulations de matières carbonées, qui ont été couverts par les sédiments marins transgressifs. La matière carbonée provient des marges d'un paléochenal, appartenant probablement à la rivière du Camaquã, dans un probable plaine déprimé. Cette plaine d'inondation a eu une flore exubérante, qui a conduit au dépôt de la matière organique et la formation de dépôts de tourbe. L'analyse du pollen a donné lieu à un faciès organiques avec une grande quantité de plantes terrestres, communes dans le dépôt de tourbe. La présence d'algues *Botryococcus* et *Zygnematomyceae*, caractérise une contribution élevée de matière continentale d'eau douce opposer la faible concentration de palynomorphes marins. La présence de grains de pollen des familles des *Chénopodiacées* et *Poaceae*, suivis par *Myrtaceae*, typiques des environnements de transition a été observée. Les résultats classifient le matériel analysé comme appartenant à une ancienne plaine inondable, appartenant probablement à la paleodrainage du fleuve Camaquã. L'âge de l'échantillon de tourbe qui a donné une âge de 10.460±40 ans BP, et l'apparition de ce dépôt à la profondeur de -60m, permet d'interpréter une longue stabilisation du niveau de la mer au cours de la dernière transgression Holocène, c'est à dire, un état de l'environnement côtier nécessaire à la genèse de ce dépôt.

### 2.7.9 (p) Unravelling the processes of ooid formation in marine and freshwater environments : the contribution of microbes

Muriel Pacton<sup>1</sup>, Vincent Grossi<sup>1</sup>, Daniel Ariztegui<sup>2</sup>, Maria Mutti<sup>3</sup>, Pierre Adam<sup>4</sup>, Philippe Schaeffer<sup>4</sup>, Claire Rollion-Bard<sup>5</sup>, Crisogono Vasconcelos<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de géologie de Lyon

<sup>2</sup>Université de Genève, Suisse

<sup>3</sup>Universität Potsdam, Allemagne

<sup>4</sup>Laboratoire de Biogéochimie Moléculaire, Université de Strasbourg

<sup>5</sup>IPG Paris

<sup>6</sup>ETH Zürich, Suisse

Ooids are small spherical carbonate grains (typically 2 mm or less in diameter) which accrete around a nucleating fragment (quartz or bioclast) in agitated environments. They display a different mineralogy (such as aragonite or low-Mg calcite) depending on the water chemistry, i.e., in lacustrine or marine settings. Although oolitic sands are widespread throughout the Phanerozoic carbonate rock record, and abundant in some modern shallow-marine carbonate systems, their formation processes is still a matter of debate. Hence, ooids are generally assumed to result from purely physicochemical processes, while organomineralization has been recently identified as a key process for freshwater ooid formation. Novel investigations based on molecular biology and lipid

biomarkers further support a potential role of microbes in the formation of marine ooids. However, the precise role of microbes in marine ooid formation remains unclear and only a detailed study at a nanoscale level can shed new light on this biogeochemical process.

The present study focuses on the comparison between freshwater and marine ooids based on the evidence of microbial activity in relation to carbonate precipitation. Different ooid samples collected in the Bahamas, Abu Dhabi and Lake Geneva were analysed using microscopic (scanning electron microscopy), spectrometric (in-situ  $\delta^{13}C$  measurements) and organic geochemical (lipid biomarker distribution and compound specific carbon isotopic composition) approaches.

Preliminary results show that, in both marine and freshwater ooids, the inner carbonate cortex displays a light C-isotopic signature and is associated with low Mg-calcite. The lipid biomarker (hydrocarbons and fatty acids) distributions and stable carbon isotopic compositions are consistent with mixed inputs from bacteria, terrestrial plants and algae to ooids. The highly similar lipid composition of freshwater and marine ooids strongly supports the hypothesis that ooid formation is mediated by a specific microbial assemblage.

### 2.7.10 (p) Caractérisation et modélisation géochimiques de la roche mère Vraconienne du bassin Sud Est constantinois-Algérie

Moussa Sadaoui<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Ressources Minérales et Energétiques, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, Algérie

Le Nord algérien a toujours intéressé les explorateurs pétroliers, cet intérêt est motivé par la présence d'importants indices d'huile et de gaz rencontrés en cours des forages.

Le bassin du Sud Est constantinois fait partie de l'Atlas saharien Sud oriental, il est situé à environ 570 km au Sud Est d'Alger, il est orienté Nord Est-Sud Ouest et à remplissage Crétacé -Tertiaire, le niveau Vraconien de ce bassin comprend une épaisse série marneuse surmontée de calcaires intercalés d'argiles.

Cette étude s'intéresse à la caractérisation et la modélisation géochimiques de la roche mère Vraconienne du bassin du Sud Est constantinois, elle est basée sur l'analyse de près de 140 échantillons appartenant à 20 sondages.

L'analyse des différents paramètres et cartes nous a permis de conclure que :

La roche mère vraconienne a une épaisseur qui varie de 200m à 900 m et disparaît au Sud dans la zone saharienne où le Cénomaniens repose en discordance sur l'Albo-Aptien.

La maturation augmente du Sud où elle est en plein fenêtre à huile vers le Nord où elle est dans la fenêtre à condensât - gaz humide. La profondeur de la fenêtre à huile est variable du fait de la différence dans l'histoire d'enfouissement et du diapirisme. La richesse en matière organique est bonne à moyenne et le potentiel pétrolier est très faible à faible sauf à quelques endroits où il est moyen.

En ce qui concerne la modélisation, globalement tous les puits simulés ont généré des quantités d'huile entre 3.4 et 16 kg d'huile /Tonne de roche, les périodes de génération se situent entre le Sénonien, l'Eocène et l'Actuel, et les quantités d'huile expulsée varient de 1.5 à 3.6 Kg/Tonne de roche sauf à quelques endroits au Nord où la roche n'a pas encore expulsé d'huile, les expulsions débutent à l'Eocène et le Miopliocène.

L'étude chromatographique des extraits du Vraconien a montré que cette matière organique est d'origine marine déposée dans un milieu hyper à relativement réducteur, nature des sédiments marneuse avec un matériel à prédominance bactérienne, ces extraits sont tous matures avec des stades de maturation différents, ils ressemblent génétiquement

aux huiles de DK et HEK, GKN et RTB.

### 2.7.11 (p) Anaerobic methane oxidation promotes deep diagenesis and blurs manganese based geochronology in Arctic Ocean sediments

Bjorn Sundby<sup>1</sup>, Pascal Lecroart<sup>1</sup>, Pierre Anschutz<sup>1</sup>, Alfonso Mucci<sup>1</sup>, Serguei Katsev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UQAR et U. McGill, Montréal, Canada

<sup>2</sup>EPOC, Talence

<sup>3</sup>GEOTOP & Department of Earth and Planetary Sciences, McGill University Montreal, Canada

<sup>4</sup>Large Lakes Observatory & Dept. Physics, Duluth MN, États-Unis

We tested the hypothesis that Mn-enriched layers in Arctic Ocean sediments are reliable time markers for interglacial periods, using a diagenetic model. Diagenesis is fuelled by two sources of organic carbon, particulate organic matter (POM) settling to the sediment surface and methane diffusing up from deep gas hydrate deposits. POM and particulate Mn are only supplied to the sediment during interglacial periods. The model includes oxidation of organic carbon and soluble reduced Mn by O<sub>2</sub>, reduction of oxidized Mn via anaerobic methane oxidation, transport of dissolved O<sub>2</sub> and Mn by diffusion, and transport of solid components by burial. O<sub>2</sub> is supplied from an overlying invariant reservoir. The effects of anaerobic CH<sub>4</sub> oxidation are simulated by prescribing reducing conditions in the lowest layer of the model. Oxidized Mn advected into this layer is reduced to soluble reduced Mn, which diffuses upwards and is reoxidized and reprecipitated by O<sub>2</sub>. The upward flux of reduced Mn is a function of the rate at which oxidized Mn is advected into the reduction layer at the bottom of the model and is not synchronous with events at the sediment-water interface. Model runs reveal that the O<sub>2</sub> penetration depth fluctuates between 2 m (during interglacials) and the depth of the reducing layer (during glacial periods). Precipitation of upward diffusing manganese generates secondary manganese enrichments that cannot be distinguished from the primary enrichment created by burial of manganese-rich interglacial sediment layers. Caution is advised when using manganese enrichments as a time marker where sediments contain gas hydrates.

### 2.7.12 (p) Environnements de dépôt et diagenèse précoce dans les schistes bitumineux perméables du bassin lacustre d'Autun

Matthieu Buisson<sup>1</sup>, François Baudin<sup>1</sup>, Johann Schnyder<sup>1</sup>, Sylvain Garel<sup>2</sup>, Françoise Behar<sup>2</sup>, Olivier Broucke<sup>2</sup>, Dominique Chabard<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>Total E&P, Paris-La Défense

<sup>3</sup>Museum d'Autun, Autun

Le bassin d'Autun, situé au Sud du Morvan, est une dépression synclinale E-O de 30 km de long sur 12 km de large qui correspond au remplissage permo-carbonifère d'un héli-graben formé lors de la distension post-hercynienne. Épaisse d'environ 1200 m, la série autunienne est constituée de dépôts lacustres à fluviaux où alternent argilites laminées, passées grés-conglomératiques et faciès volcano-sédimentaires. Les quatre assises qui constituent l'Autunien renferment toutes des passées plurimétriques de schistes bitumineux qui ont été appelées Couches d'Igornay, de Lally, de Muse et de Surmoulin. Au sommet de la série autunienne, une dizaine de couches de schistes bitumineux constituent le

faisceau des Télots et le groupe des bogheads couronne la série avec un charbon d'algues (*Botryococcus*) contenant plus de 50% de Corg. L'étude du contenu organique et des minéraux argileux des sédiments du forage Chevrey 1 permet de reconstituer les conditions paléoenvironnementales qui régnaient dans le lac lors du dépôt de couches riches en matière organique. Cinq intervalles de la carotte Chevrey ont ainsi été particulièrement étudiés.

Les teneurs en Corg sont comprises entre 14 et 24% avec des index d'hydrogène moyens de 400 mgHC/gCOT. Les profils des hydrocarbures obtenus en GC montrent la dominance des n-alcane légers et moyens.

L'assemblage argileux est dominé très majoritairement par le couple illite-smectite (constituant jusqu'à 80% de l'assemblage argileux). L'illite domine généralement les assemblages, marquant un environnement de dépôt à forts apports détritiques. Des pics de smectite pourraient correspondre à des altérations de minéraux volcaniques en relation avec l'activité volcanique documentée sur les pourtours du bassin d'Autun. Les variations relatives de la smectite et de la kaolinite semblent plus marquer des variations climatiques et/ou, pour cette dernière un effet diagenétique lié à la présence de matière organique.

### 2.7.13 (p) Are anoxic or euxinic conditions a prerequisite for deposition of organic-rich intervals? The case of the Vaca Muerta Fm. in the SW Neuquén Basin (Argentina)

Nesma Krim<sup>1,2</sup>, Nicolas Tribouvillard<sup>3</sup>, Armelle Riboulleau<sup>3</sup>, Viviane Bout-Roumazielle<sup>3</sup>, Cédric Bonnel<sup>2</sup>, Patrice Imbert<sup>1</sup>, Guilhem Hoareau<sup>2</sup>, Bertrand Fasentieux<sup>2</sup>, Charles Aubourg<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>2</sup>LFC-R, Pau

<sup>3</sup>Géosystèmes, Lille

The Tithonian-Berriasian Vaca Muerta Fm is one of the most prolific source rocks in the Neuquén Basin (Argentina). It consists of organic-rich, dark brown to black shales and mudstones deposited during a major transgression. Previous works interpreted the organic-rich Vaca Muerta Fm. as deposited under anoxic conditions (Spalletti, 2000; Kietzmann, 2011) or euxinic conditions (Legarreta and Uliana, 1991), which conditions are largely considered to be a pre-requisite to account for organic-matter preservation, thence its burial in significant proportions. To constrain the environmental conditions (assessment of paleoredox conditions and water-mass restriction) of the Vaca Muerta Fm., 59 samples from a first fieldtrip were picked on the north flank of the Picún Leufú Anticline (southern part of the Basin) for organic/inorganic geochemical characterization.

Trace metals proxies, basing on uranium vs. molybdenum authigenic enrichments indicate that depositional conditions favored the operating of the so-called particulate iron shuttle, which, together with the absence of marked enrichment in vanadium indicates an oxic water column and reducing conditions at shallow depth below the sediment-water interface (Algeo and Tribouvillard, 2009). Besides, the TOC vs. Mo diagram (Algeo and Lyons, 2006; Algeo et al., 2007) designed to visualize the paleo-degree of water mass restriction, shows a dominant "Saanich Inlet-type" distribution, suggesting moderate water mass restriction with episodic limitation of water mass circulation during the first part of the Vaca Muerta deposition (organic-rich intervals).

In conclusion, high organic content is not always a byword of anoxia and water mass restriction. Full anoxia and restriction are not the optimal conditions to make prolific source rock and normal marine conditions with occasionally-limited connections with open sea can produce an excellent source rock : the Vaca Muerta (southern Neuquén Basin) constitutes a good example.

### 2.7.14 (p) Petrography and diagenesis of sedimentary phosphorite deposits in Djebel Onk basin, Algeria

Hacene Redjehimi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de géologie, Université Badji Mokhtar-Annaba, Sidi Amar, Annaba, Algérie

Phosphate rocks are important economic resources. The sedimentary succession of Djebel Onk, which is characterised by the deposition of phosphatic formations of Late Palaeocene - Early Eocene age (Upper Thanetian-Lower Ypresian), range in age from Upper Cretaceous (Maastrichtian) to the Eocene (Lutetian); this marine sequence of approximately 500m thick is overlain in discordance by a thick continental sequence of sand and clays of Miocene age, then by the Quaternary deposits. The Thanetian sequence starts with dark grey marls and pass up section to thick economic phosphorite layer of about 30m at Djebel Onk and which thins until it disappears northwards, the West and the South of this economic phosphorite layer generally ends by a lumachellic level.

The economic phosphorite layer crops out as a NE-SW lenticular body of friable gray-brown phosphorites and consists of two phosphate horizons, bright (friable brown), at the upper part, and dark (gray-black), at the lower part. These two horizons evolve laterally, either in a single layer of brown phosphorite or in a layer of black phosphorite. Petrographic analysis of thin sections and scanning electron microscope observations of the studied phosphate samples indicate that the phosphate ore mainly consists of structureless peloids, the most common phosphate grains, and other minor phosphatic grains like bone fragments, fish teeth and coprolites, that were cemented authigenically by dolomite and microcrystalline Si-rich phase, which have been formed by diagenetic processes.

Based upon on the environment of deposition for the phosphate grains, the detailed Petrographic analysis using back scattered electron (BSE) imaging, and taking into account the paleogeography of Djebel Onk basin. The following main diagenetic processes affecting the Upper Paleocene phosphorites of the Djebel Onk include : (1) accumulation of phosphate grains, (2) compaction, (3) dolomite cementation, (3) minor amount of other diagenetic mineral cements : opal-CT, K-feldspar overgrowth, clinoptinolite and pyrite, (4) dissolution of dolomite crystals and calcite cementation.

### 2.7.15 (p) Vers un modèle sédimentaire et stratigraphique intégré des dépôts liasiques riches en matière organique en Europe

Benjamin Bruneau<sup>1</sup>, Isabelle Moretti<sup>2</sup>, François Baudin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>iSTeP, Paris

<sup>2</sup>GDF Suez Exploration production, Paris-La Défense

Au Lias le super continent Pangée est en cours de fracturation : deux continents s'individualisent Gondwana au Sud et Laurasia au Nord, séparés par la Téthys en formation.

L'Europe, située à l'Ouest de la Téthys, est progressivement envahie par les eaux. Deux grands domaines sont alors distinguables sur cette vaste surface épicontinentale :

- Au Nord-Ouest, le domaine boréal marin peu profond et confiné, caractérisé par de nombreux micro-bassins séparés par des hauts fonds et des terres émergées.

- Au Sud-Est, le domaine méditerranéen profond et ouvert sur la Téthys. Ces deux domaines sont fondamentalement différents de par leur bathymétrie, leurs courants, leurs conditions de dépôts et leurs faunes.

C'est dans ce contexte paléogéographique que vont se mettre en place des dépôts sédimentaires riches en Matière Organique. Différents processus, phénomènes et événements géologiques sont mis en avant dans la littérature pour expliquer ces forts TOC : upwelling, production primaire, taux de sédimentation, anoxie, climat, variations minéralogiques...

L'objectif de cette thèse est d'apporter une meilleure compréhension de l'évolution des bassins européens durant le Lias, de leur connectivité, des différences entre les domaines boréal et méditerranéen ainsi que la répartition/hétérogénéité des dépôts riches en MO afin d'élaborer un modèle prédictif.

Le travaux prévus sont : 1) caractériser ces dépôts riches en MO du Lias en Europe par des analyses géochimiques (TOC, %CaCO<sub>3</sub>, δ13C) et minéralogiques (DRX) ; 2) caractériser les environnements de dépôt par une approche sédimentologique naturaliste ; 3) définir et hiérarchiser les processus à l'origine des hétérogénéités de la MO : upwelling, production primaire, taux de sédimentation, anoxie, climat, variations minéralogiques ; 4) tester les différentes hypothèses proposées via la modélisation stratigraphique numérique avec le logiciel Dionisos Matière-Organique (IFP Energies Nouvelles).

## 2.8 Plates-formes carbonatées, évaporites et évolution des écosystèmes (ASF)

### Responsables :

- Philippe Léonide (CEREGE, Aix - Marseille Université)  
leonide@cerege.fr
- Marc Floquet (CEREGE, Aix - Marseille Université)  
floquet@cerege.fr
- Raphael Bourillot (ENSEGID, EA 5692, Bordeaux)  
raphael.bourillot@ipb.fr

### Résumé :

L'analyse des relations entre les perturbations des environnements et des écosystèmes est un enjeu majeur pour la compréhension de l'histoire et de l'évolution de notre planète. Dans ce cadre, les plates-formes carbonatées et les dépôts évaporitiques associés sont des objets géologiques particulièrement intéressants car les sédiments produits et préservés sur ces plates-formes sont un reflet du développement, de l'évolution et de la disparition des écosystèmes. La compréhension des facteurs de contrôle sur la répartition des faciès sédimentaires et sur l'architecture stratigraphique des plates-formes carbonatées est un défi majeur en sédimentologie des carbonates. Il y a peu de consensus sur les principaux facteurs de contrôles sur le fonctionnement des systèmes carbonatés notamment avec des travaux récents mettant l'accent soit sur l'importance de l'usine de carbonate, soit sur des paramètres tectoniques ou bien encore sur l'interaction entre des paramètres de production-transport ou du rôle de la topographie initiale et de la subsidence différentielle. Dans cette session, nous accueillerons des études intégratives d'un point de vue méthodologique (sédimentologique, diagénétique, géochimique, structurale, chronologique...) traitant 1) de l'architecture des faciès et des modèles de dépôt des systèmes carbonatés et évaporitiques, 2) des différents types d'usines de carbonate et de leur variabilité dans le temps et dans l'espace, 3) du rôle de la tectonique sur l'architecture stratigraphique et 4) de l'apport de la modélisation numérique basée processus dans la discrimination des facteurs de contrôles sur l'architecture stratigraphique des systèmes carbonatés.

### 2.8.1 (o) Facteurs contrôlant l'évolution des paléoenvironnements et de l'architecture des carbonates du jurassique moyen et supérieur de l'ouest du bassin de paris

Simon Andrieu<sup>1</sup>, Benjamin Brigaud<sup>1</sup>, Jocelyn Barbarand<sup>1</sup>, Eric Lasseur<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GEOPS, Orsay

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

Le Jurassique est connu comme étant une période très favorable pour le développement de plateformes carbonatées dans les bassins ouest-téthysiens. De nombreuses études ont été menées dans divers bassins intracratoniques en France, Espagne, Angleterre, Allemagne, Pologne, Suisse ou encore Egypte, permettant d'avoir un cadre biostratigraphique bien contraint. Néanmoins, la part relative des différents facteurs de contrôle (eustatisme, tectonique, chimie de l'océan ou climat) sur le développement des systèmes carbonatés dans ces bassins demeure compliquée à mettre en évidence.

Au Jurassique moyen et supérieur, une grande plateforme carbonatée se développe dans l'Ouest de la France, de la Normandie aux Charentes, en passant par la Sarthe et le Poitou. Des affleurements de qualité, le long des côtes normandes ou des Charentes et dans de très nombreuses carrières, offrent l'opportunité d'étudier cette vaste plate-forme sur un transect Nord-Sud d'environ 400 kilomètres.

La première étape de ce travail a consisté à la réalisation d'une étude de terrain permettant de lever plus d'une centaine de coupes sédimentaires exposant des carbonates aaléniens à oxfordiens. Quatre zones d'affleurements ont été définies (Calvados, Orne/Sarthe, Poitou et Charentes) et pour chacune d'elles une coupe synthétique a été dressée. Il est ainsi possible de définir une dizaine de séquences stratigraphiques de 3<sup>ème</sup> ordre. Deux périodes majeures de production carbonatée de domaine marin au Bathonien moyen/supérieur et à l'Oxfordien moyen ont pu être définies, marquées par des faciès variés allant de mudstone à thalassinoïdes et bélemnites à des grainstones oolithiques ou à bryozoaires.

L'étude précise de l'architecture stratigraphique, des paléoenvironnements et de la distribution des faciès dans chacune des séquences permettra de mieux comprendre l'influence relative de l'eustatisme, de la tectonique et du climat sur l'évolution à grande échelle (400 km) d'une plateforme carbonatée.

### 2.8.2 (o) Contrôles diapiriques sur les systèmes de plates-formes carbonatées du jurassique inférieur dans le haut-atlas central, Maroc

Rémi Joussiaume<sup>1</sup>, Manon Malaval<sup>1</sup>, Philippe Razin<sup>1</sup>, Carine Grélaud<sup>1</sup>, Eduard Saura<sup>2</sup>, Juan Diego Martin-Martin<sup>2</sup>, Jaume Vergès<sup>2</sup>, David-William Hunt<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ENSEGID, Pessac

<sup>2</sup>Institut de ciències de la terra Jaume Almera, Barcelona, Espagne

<sup>3</sup>STATOIL (TPD RD), Bergen - Norvège

Les affleurements spectaculaires de plates-formes carbonatées du Jurassique inférieur dans les montagnes du Haut-Atlas (Maroc) sont étudiés afin d'analyser l'évolution sédimentaire de leurs bordures bioconstruites, en réponse aux déformations associées à des mouvements de sel et d'argiles (diapirisme). Au cours du Lias inférieur et moyen, de vastes plates-formes carbonatées peu profondes dominaient l'ensemble du bassin intracontinental atlasique. Cependant, des bassins plus profonds caractérisés par une sédimentation hémipélagique et gravitaire se sont développés localement et à des périodes particulières dans des régions plus subsidentes, contrôlées tectoniquement. Les mouvements

diapiriques d'argiles et d'évaporites triasiques sous-jacentes sont associés à des failles normales ou décrochantes actives, et jouent un rôle majeur sur l'architecture complexe des systèmes carbonatés et sur les relations plate-forme-bassin. La configuration fortement aggradante des systèmes carbonatés démontre un taux important de subsidence générale. Ce taux de subsidence diminue au droit des diapirs et augmente au-dessus de leurs bordures. Plusieurs stades d'évolution ont été différenciés. Pendant la phase d'initiation des mouvements diapiriques, l'augmentation différentielle de subsidence est compensée par la production carbonatée. Ce stade est enregistré par des variations latérales d'épaisseur, sans variation latérale significative de faciès. Pendant la période de paroxysme des déformations diapiriques, la production carbonatée compense la création d'accommodation (keep-up) au droit des diapirs alors que des bassins profonds se développent le long de leurs bordures (rim synclines). Cette phase est enregistrée à la fois par des variations latérales d'épaisseur et de faciès.

Pendant une phase de quiescence relative, les plates-formes carbonatées continuent d'aggrader tandis que les paléo-bassins sont progressivement remplis. Cette phase passive peut être enregistrée par des terminaisons en onlap sur les bordures de plates-formes. Finalement, la crise écologique du Pliensbachien supérieur conduit à une diminution de la production carbonatée et au développement de systèmes mixtes carbonatés-silicoclastiques (Fm. Amezraï).

### 2.8.3 (o) Caractérisation d'une sédimentation syndiapirique dans la région d'Imilchil, haut-atlas central, Maroc

Manon Malaval<sup>1</sup>, Rémi Joussiaume<sup>1</sup>, Carine Grélaud<sup>1</sup>, Philippe Razin<sup>1</sup>, Grégoire Messenger<sup>2</sup>, Juan Diego Martin-Martin<sup>3</sup>, Eduard Saura<sup>3</sup>, Jaume Vergès<sup>3</sup>, David W. Hunt<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ENSEGID, Pessac

<sup>2</sup>STATOIL (TPD RD), Bergen, Norvège

<sup>3</sup>Institute Earth Sciences Jaume Almera (CSIC), Barcelona, Espagne

La chaîne de l'Atlas résulte de l'inversion tectonique d'un bassin intracontinental mésozoïque durant la phase néogène alpine. La formation du bassin atlasique s'initie par une première phase de rifting au Trias, qui enregistre une sédimentation continentale (argiles rouges, grès, évaporites) et des dépôts/intrusions magmatiques. Le second épisode extensif majeur, au cours du Jurassique, est marqué par différentes phases de distension/transtension couplées à la subsidence thermique, qui sont à l'origine d'une architecture de bassin complexe. Cette phase d'extension s'accompagne d'une activité diapirique, à l'origine d'intrusion de matériel triasique et magmatique le long des grandes failles majeures.

Ces structures diapiriques sont particulièrement bien préservées dans la région d'Imilchil au cœur du Haut-Atlas central, qui constitue une zone d'étude idéale pour la compréhension des relations entre sédimentation et diapirisme. Les rides diapiriques dont le cœur est composé essentiellement d'argiles rouges du Trias et de roches magmatiques (basaltes, dolérites) mais de peu d'évaporites, s'apparentent à des structures anticlinales. Elles présentent des flancs dissymétriques formés par une série sédimentaire qui débute au Toarcien et s'achève au Bathonien.

L'objectif est de caractériser l'évolution des systèmes sédimentaires et la répartition des faciès dans un contexte de subsidence régionale associée à une déformation diapirique locale.

Les relations entre les mouvements diapiriques et la sédimentation peuvent être mises en évidence par des géométries internes aux formations, par une influence locale sur les profils de dépôts à l'origine de variations de faciès aux abords des diapirs, et/ou par des événements sédimentaires particuliers.

Ces évidences syngénétiques, témoins des déformations, permettent de distinguer trois grandes phases de mouvements diapiriques.

### 2.8.4 (o) Facies and depositional settings during the Smithian in the Torrey area (Early Triassic, Utah, USA)

Gwénaél Caravaca<sup>1</sup>, Nicolas Olivier<sup>1</sup>, Arnaud Brayard<sup>2</sup>, Emmanuelle Vennin<sup>2</sup>, Gilles Escarguel<sup>1</sup>, Emmanuel Fara<sup>2</sup>, Kevin Bylund<sup>3</sup>, James Jenks<sup>3</sup>, Daniel Stephen<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LGLTPE, Lyon

<sup>2</sup>Biogéosciences, Dijon

<sup>3</sup>Department of Earth Science, Utah Valley University, Orem, Utah, États-Unis

The Permian-Triassic transition records the most devastating biotic crisis of the Phanerozoic with 90% of the marine genera being eradicated. The aftermath of this extinction is usually portrayed by large environmental perturbations such as ocean acidification, anoxia, euxinia and fluctuating productivity. However, these fluctuating conditions and their impact on the nature and tempo of the biotic recovery are still under debate. Thus, it is important to decipher the nature of the depositional settings and their putative spatio-temporal variations in order to improve our knowledge of post-crisis environments. The present work focuses on well-exposed Lower Triassic sedimentary rocks in the Torrey area (south-central Utah, USA). The studied Smithian deposits record a large-scale 3rd order sea-level cycle allowing a detailed reconstruction of the depositional setting evolution. In the middle Smithian, peritidal microbial limestones associated to a rather low-diversity benthic fauna deposited seaward of siliciclastic red beds of a tidal flat. Associated with siliceous sponges, microbial limestones formed small dm-scale patch reefs. During the late middle to late Smithian interval, tidal flat dolostones of interior platform, ooid-bioclastic deposits of tide-dominated shoal complexes, and mid-shelf bioclastic limestones characterize the sedimentary system. Microbial deposits correspond to sparse stromatolites that formed in the interior platform. They are contemporaneous of a well-diversified marine fauna found in seaward shoal complexes and mid-shelf area. The nature and the distribution of these Smithian microbial deposits were triggered by the depositional setting and did not support any peculiar deleterious environmental conditions.

### 2.8.5 (o) Facteurs de contrôle sur le développement des microbialithes dans une lagune hypersalée, Cayo Coco, Cuba

Anthony Bouton<sup>1</sup>, Aurélie Pace<sup>2</sup>, Emmanuelle Vennin<sup>1</sup>, Raphaël Bourillot<sup>2</sup>, Christophe Thomazo<sup>1</sup>, Pieter Visscher<sup>3</sup>, Christophe Dupraz<sup>3</sup>, Guy Désaubliaux<sup>4</sup>, Eric Portier<sup>4</sup>, Reinaldo Rojas<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Biogéosciences, Dijon

<sup>2</sup>ENSEGID, Pessac

<sup>3</sup>Department of Marine Sciences, Center for Integrative Geosciences, États-Unis

<sup>4</sup>GDF-Suez, Direction E&P, Paris la Défense

<sup>5</sup>Museo Nacional de Historia Natural, Ciudad Habana, Cuba

L'étude des systèmes sédimentaires carbonatés microbiens actuels contribue à renforcer nos connaissances sur les conditions environnementales nécessaires pour l'établissement de ces tapis microbiens ainsi que leurs morphologies particulières associées. La plate-forme Nord-Cubaine renferme des environnements propices au développement de systèmes carbonatés microbiens. Notre étude porte sur une lagune (1000 m long pour 600 m de large) s'insérant dans un réseau lagunaire complexe s'étendant sur près de 10 km, situé au sud de l'île de Cayo Coco et en connexion avec un important lagon côtier (plus de 800 km<sup>2</sup>). En Janvier 2013, la lagune présentait des conditions hypersalines (entre 67 et 75‰) et légèrement alcalines (pH fluctuant entre 8.19 et 8.77).

Quatre environnements de dépôts ont pu être identifiés du pourtour vers le centre de la lagune : (i) Mangrove, (ii) Substratum supratidal, (iii), Platier intertidal et (iv) Lagune subtidale. L'essentiel de l'activité microbienne est concentrée dans les deux dernières zones (iii et iv), la majorité des tapis microbiens présentant des indices de minéralisation étant regroupés dans la zone intertidale (iii), tandis que la zone subtidale (iv) montre un matériel microbien non minéralisé. Le vent semble être un des facteurs de contrôle primordial sur la morphologie des microbialithes de la zone intertidale puisque les secteurs sur et sous le vent montrent des édifices de morphologies et tailles différentes. Dans les secteurs protégés, les microbialithes s'organisent en tapis plans ainsi qu'en hémisphéroïdes à faible relief. En revanche, les zones face au vent seront quant à elles caractérisées par des microbialithes de formes complexes incluant des rides parallèles dont l'orientation est perpendiculaire aux vents dominants. L'absence d'associations floro-fauniques d'affinité marine et la présence quasi exclusive de biomasse de type microbialites semblent pouvoir être le reflet de fortes variations de salinité de ces lagunes.

### 2.8.6 (o) Répartition, faciès et minéralisation des microbialithes du Grand Lac Salé (Utah, USA)

Aurélien Pace<sup>1</sup>, Anthony Bouton<sup>2</sup>, Raphaël Bourillot<sup>1</sup>, Emmanuelle Vennin<sup>2</sup>, Pieter Visscher<sup>3</sup>, Christophe Dupraz<sup>4</sup>, Christophe Thomazo<sup>2</sup>, Serge Galaup<sup>1</sup>, Sophie Leleu<sup>1</sup>, Anna Kwasniewski<sup>5</sup>, Léa Pigot<sup>1</sup>, Michel Franceschi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ENSEGID, Pessac

<sup>2</sup>Laboratoire Biogéosciences, Dijon

<sup>3</sup>Department of Marine Sciences, Center for Integrative Geosciences, University of Connecticut, États-Unis

<sup>4</sup>Department of Geological Sciences Stockholm University, Suède

<sup>5</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

Le Grand Lac Salé (GSL), situé dans la province des Basin and Range (USA) est un lac hypersalin endoréique, en partie alimenté par les eaux de pluie. Du fait de sa salinité élevée (en moyenne de 140g/L), les prédateurs sont en très faible abondance, favorisant le développement des microbialithes recouvrant les marges du lac.

Le but de cette étude est de comprendre la répartition, les faciès et les processus de minéralisation des microbialithes fossile et moderne sur la côte ouest d'Antelope Island. Les stromatolithes et thrombolithes serviront d'archives sédimentaires pour décrypter les nombreuses variations géochimiques de l'eau du lac au cours du temps. La répartition spatiale des microbialithes et leurs morphologies ont été replacées sur une carte détaillée des dépôts carbonatés, silicoclastiques et microbiens, associée à des transects de détail de la bordure vers le centre du lac. La dynamique sédimentaire, la nature du substrat et la tectonique syn-sédimentaire semblent contrôler en partie la distribution des microbialithes ainsi que leurs morphologies. Les microfabriques présentent une grande diversité, certaines sont essentiellement construites par de la précipitation carbonatée bio-induite alors que d'autres sont dominées par le piégeage et l'agrégation d'oïdes et de pellets.

Plusieurs analyses ont été effectuées pour déterminer la minéralogie et la géochimie des précipitations microbiennes afin d'étudier la préservation du signal environnemental. Des mesures de perméabilité et de porosité couplées à de l'imagerie tri-dimensionnelle au CT scan sont utilisées afin de préciser et de comprendre les différentes phases de transformation des microbialithes au cours de la diagenèse. Des analyses Cryo-MEB ont également été réalisées sur des échantillons vivants permettant d'observer des précipitations actuelles, dans le tapis microbien.

Ces résultats sont un nouveau pas vers la compréhension du fonctionnement du système sédimentaire du GSL.

### 2.8.7 (o) Impact de l'histoire géologique sur la production d'hydrocarbures : comparaison des champs carbonatés de Vic Bilh et Parentis

Antoine Veillerette<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Vermilion Energy - Parentis en Born - France

La société Vermilion est aujourd'hui opératrice de la majorité des champs à hydrocarbures liquides Français. Elle est ainsi détentrice d'une base de données considérable concernant en particulier leur découverte, les études géologiques menées, ainsi que les historiques de production, parfois sur plus d'un demi-siècle. Une synthèse est alors possible et nécessaire pour mieux comprendre comment l'histoire géologique de chaque champs a impacté sa production : nous comparerons ici deux champs carbonatés majeurs du Bassin Aquitain, Parentis et Vic Bilh.

Ces deux champs situés à moins de 150 km l'un de l'autre produisent à partir des mêmes niveaux réservoirs (Jurassique terminal à crétacé inférieur), déposés dans un environnement paléogéographique très similaire. Néanmoins leurs histoires structurales différentes, liées à leur position dans le bassin Aquitain, ont entraîné des évolutions diagénétiques originales, à l'origine de grandes variations d'hétérogénéité de réservoir.

Les facies dolomitiques constituent les niveaux réservoirs les plus intéressants par rapport aux facies calcaires, surtout quand ils sont associés à de la fracturation. Leur distribution dépend initialement de la paléogéographie, mais surtout de l'évolution diagénétique en relation avec les circulations fluides post-dépôt. Celles-ci ont été très différentes entre les deux champs. La répartition spatio-temporelle des niveaux barrières, leur niveau d'efficacité, la distribution des niveaux naturellement fracturés et bréchifiés, les systèmes de failles, ainsi que l'histoire post-dépôt (émersion, érosion or colmatage) ont façonné une architecture réservoir propre à chaque champs, impactant fortement les historiques de production et les récupérations ultimes.

Mieux comprendre ces particularités doit nous permettre d'optimiser au mieux les productions restantes de ces champs, mais aussi de nous aider dans l'appréciation de nos objectifs d'exploration.

### 2.8.8 (p) Le potentiel pétrolier de l'aptien et l'albien dans le bassin sud-est constantinois (Algérie)

Amar Asses<sup>1</sup>, Kh. Loumi<sup>1</sup>, Ma. Ferhat<sup>1</sup>, N. Hamouta<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Boumerdes, Algérie

Les réservoirs carbonatés du Crétacé dans la partie orientale de l'Atlas Saharien d'Algérie constituent un objectif d'exploration que confirment les découvertes d'hydrocarbures réalisées ; leurs profondeurs est accessible par forage.

Les analyses sédimentologique, pétrographique et l'évolution diagénétique des dépôts concernés permet d'évaluer leur qualité réservoir et leur potentiel pétrolier.

Situé au nord-est de l'Algérie, ce bassin est limité géographiquement par les latitudes 34°00' et 35°00' Nord et les longitudes : 05°00' - 9°00' Est. Du point géologique, il est encadré :

- Au Nord et au Nord-Ouest par la terminaison orientale des zones telliennes
- Au Sud et au Sud-est par le môle de Feriana.
- Au Sud-ouest par le môle de Biskra.
- A l'Ouest par le bassin du Hodna.

Les roches mères sont principalement vraconienne, cénomaniennne et turonienne et elles diffèrent par leur degré de maturation.

Les réservoirs aptien-albien calcaro-dolomitiques, bioclastiques et argilo-gréseux ont des épaisseurs variant entre 300 et 1000m.

D'après l'étude sédimentologique, onze microfaciès ont été mis en évidence, caractérisant l'ensemble des milieux de dépôts depuis la plate-forme néritique jusqu' à la plateforme distale. Plate-forme néritique : représentée par un faciès anhydritique, un calcaire dolomitique, une dolomie cristalline, un calcaire oolithique et un calcaire à gros foraminifères benthiques. Plate-forme médiane : représentée par un calcaire à échinodermes, des bioclastes brisés et remaniés et un calcaire à pellets. Plate-forme distale et le bassin : représentés par des calcaires à foraminifères planctoniques, des argiles carbonatées et des calcaires à pellets et des microfaunes pélagiques. L'étude pétrographique a révélé que les caractéristiques pétrophysiques sont très médiocres, la porosité est inférieure à 1%.

Les processus diagénétiques défavorables sont plus importants que ceux participant à la création de vides connectés.

La capacité pétrolière de ces niveaux étudiés ne semble pas évidente à cause de l'importance de la diagénèse qui a participé à la destruction de la matière organique et la réduction du vide matriciel.

Pour cela nous avons mené une étude structurale pour apprécier le rôle de la fracturation dans l'amélioration du stockage mais surtout de l'écoulement des fluides (perméabilité secondaire de fracture).

### 2.8.9 (p) Etude lithostratigraphique et diagénétique des calcaires maastrichtiens de la coupe d'El Kantara (Aures occidental. Algérie)

Sana Benmansour<sup>1</sup>

<sup>1</sup> rue Abdou ammar n°15 ras el aioun, Batna, Algérie

Dans l'Aurès occidental et à 60 Km au sud ouest de la wilaya de Batna, se situent les gorges d'el kantara. La coupe a été levée dans la combe sénonienne sur le flanc méridional de Dj. Metlili.

L'inventaire lithologique et paléontologique de notre coupe révèle une formation calcaire d'âge maastrichtienne, repose sur 400 m d'épaisseur environ. Elle est datée par des orbitoïdes et des laffitteines.

L'analyse microfaciologique permet de déterminer un milieu de plate forme interne peu profond parfois agité, représentée par des textures packstones à grainstones à brayozaïres (Cyclostomes), algues (dasycladacea) et à orbitoïdes (Emphalocyclus macroporus, Orbitoïde média d'archiac,...) et à laffitteines (Laff ?tteina oeztuerki, Laffitteina aft bibensis Marie, ...).

L'étude diagénétique montre des phénomènes liés aux processus biologiques tels que la microperforation, l'encroûtement biologique, la micritisation et la bioturbation, représentant l'éogénèse. La diagénèse tardive est représentée essentiellement par la compaction et la cimentation.

### 2.8.10 (p) Caractérisation Pétrophysique des Carbonates par Couplage de la Modélisation Stratigraphique et Diagénétique

Cyprien Lanteaume<sup>1</sup>, François Fournier<sup>1</sup>, Jean Borgomano<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

La modélisation stratigraphique directe 3D des carbonates (e.g. avec le logiciel DIONISOS : Granjeon, 1997 ; Granjeon & Joseph, 1999), permet la réalisation effective de grilles numériques stratigraphiques 3D, contenant des informations sédimentologiques, faciologiques et géométriques mais ne modélise pas les transformations diagénétiques des sédiments (précoces et tardives) et du réseau poreux. La non prise en compte

des processus diagénétiques dans la réalisation des modèles stratigraphiques présente deux inconvénients majeurs : (1) les effets de la lithification précoce sur l'évolution du profil de dépôt et de la dynamique sédimentaire ne sont pas modélisés ; (2) la grille stratigraphique numérique ne contient pas d'information sur les transformations diagénétiques du réseau poreux ce qui rend difficile son utilisation dans la construction des modèles réservoirs.

La démarche développée pour caractériser les propriétés pétrophysiques des réservoirs carbonatée en 3D ( $\Phi$ ,  $K$ ,  $V_p$ ,  $V_s$ ) à partir du logiciel

DIONISOS s'articule autour de trois phases : (1) construire des modèles 3D réalistes de systèmes carbonatés à une échelle régionale ; (2) établir des corrélations spatio-temporelles entre les faciès de dépôt et les séquences diagénétiques ; (3) développer un code numérique intégrant la diagénèse précoce dans la modélisation des processus sédimentaires. Cette méthode de modélisation est appliquée à l'exemple de la plateforme urgonienne (Barrémien-Aptien) du Sud-Est de la France dans l'optique de prédire la distribution spatiale à l'échelle du bassin des calcaires microporeux.

## Thème 3

# Enveloppes et dynamique internes - *Internal envelopes and dynamics*

**Animateurs** : Jean-Paul Callot (LFC-R, Pau), Stéphanie Duchêne (GET, Toulouse), Joseph Martinod (GET, Toulouse), Jean-Claude Ringenbach (Total, Pau)

### 3.1 Noyaux planétaires (SEDI)

#### (Planetary cores)

**Responsables :**

- Jérôme Noir (ETH Zurich)  
jerome.noir@erdw.ethz.ch
- Philippe Cardin (ISTERRE, Grenoble)  
philippe.cardin@ujf-grenoble.fr

**Résumé :**

Cette session a pour objectif de faire le point sur les recherches observationnelles, expérimentales, numériques et théoriques portant sur les noyaux planétaires métalliques, leur structure, leur composition, leur dynamique, leur formation et leur évolution. Cela comprend les études géophysiques et géomagnétiques, géochimiques et minéralogiques ainsi que les modélisations hydrodynamiques et magnétohydrodynamiques dans une approche multi-disciplinaire.

**Astract :**

This session is oriented toward research related to planetary cores dynamics, structure, composition, formation and evolution. It aims to be a cross disciplinary session including geophysics, geomagnetic, magneto-hydrodynamics, geochemistry and mineralogy studies. We welcome observational, experimental, numerical and theoretical contributions.

### 3.1.1 (o) Impact of grain shape on the seismic properties of heterogeneous materials, and applications to the uppermost inner core

Marie Calvet<sup>1</sup>, Ludovic Margerin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*IRAP, Toulouse*

The strong attenuation of PKIKP waves which bottom in the inner core and the strong coda of P-reflected waves at the inner core boundary suggest that the uppermost inner core is highly heterogeneous. Moreover, the eastern hemisphere of the inner core is characterized by isotropic P-wave velocity and strong attenuation whereas the western hemisphere exhibits lower P-wave velocity, less overall attenuation and anisotropy both in velocity and attenuation. While the hemispherical pattern of velocity and attenuation can be explained by variable grain size, anisotropy calls for the existence of preferential directions in the material. We have investigated the role of grain elongation and flattening on the propagation of elastic waves in two-phase materials and single-mineral-cubic aggregates with overall transverse isotropic symmetry. Based on the Dyson equation, explicit expressions of attenuation and phase velocity for q-P, q-SV and q-SH waves have been derived. Attenuation and velocity strongly vary with the frequency, the direction of propagation and the grain shape. We find that the directions of propagation in which the velocity and attenuation are extremal do not necessarily coincide with the symmetry axes of the material. Anisotropic textures compatible with the hemispherical pattern of seismic properties in the uppermost inner core will be presented and discussed.

### 3.1.2 (o) On the structure of iron in the Earth's Inner Core

Ainhoa Lincot<sup>1</sup>, Philippe Cardin<sup>1</sup>, Sébastien Merkel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*ISTerre, Grenoble*

<sup>2</sup>*UMET, Lille*

Seismological studies reveal a 3 to 3.8% cylindrical anisotropy in the Earth's inner core resulting from processes affecting properties of its constituent polycrystals. We use a numerically grown inner core with an excess growth in the equatorial belt to study the development of texture and elastic anisotropy at the microscopic level and simulate the measurement of seismic anisotropy through the model. The published elastic constants of hexagonal and cubic iron at the inner core conditions fail to reproduce the global anisotropy so we use a Monte Carlo method to find which would be the adequate microscopic properties to recover a few percent of global anisotropy. With our geodynamical model, the global inner core anisotropy is 7 to 10 times smaller than that of the single crystal. Compositional stratification amplifies the global anisotropy by 40% while the addition of solidification textures reduces it by a factor of 3.

### 3.1.3 (o) Crystallization processes in the presence of background flow

Sophie Miralles<sup>1</sup>, Jérôme Noir<sup>1</sup>, Andy Jackson<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institut für Geophysik, ETH, Zürich, Suisse*

Most of the celestial bodies have a liquid layer in their internal structure (subsurface ocean, magmatic ocean, electrically conducting liquid core,...). At the boundaries of these fluids, solidification take place under secular cooling of planets. Crystallization in geo and astrophysical objects is generally occurring in presence of a background flow. Those flows are driven either by convection or mechanical forcing. As

on Earth, the convection is caused by the release of heat and of light elements (due to crystallization of the inner core), radioactive processes or tidal heating.

We focus on the details of heat transport when crystallization is interacting with a background flow (laminar or turbulent), on the large scale structures of the interface solid/liquid, on the advection of crystals in the bulk and the growth mechanism of the crystals. We propose an experimental approach with the study of solidification of a pure or binary system interacting with thermal and/or compositional convection flows.

### 3.1.4 (o) Search for a structure at the base of the liquid core in relation to freezing-melting of the inner core

Annie Souriau<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*IRAP, Toulouse*

Models of liquid core structure have revealed the existence of a low P-velocity gradient in the lowermost 150 km above inner core boundary (ICB), sometimes called the F-layer. It may be due to a density increase compared to the overlying liquid, and may result from a partial re-melting of the previously frozen inner core, which is depleted in light elements compared to the liquid core. A dynamical model implying a permanent inner core translation, with freezing at one hemisphere and melting at the opposite hemisphere, is one of the possible mechanisms to generate this layer, it is also able to explain the hemispherical pattern of the inner core seismological structure.

If the translation model is valid, one may expect the release of light elements away from ICB in the freezing hemisphere, and the release of dense liquid in the melting hemisphere. We may thus expect a hemispherical variation in the structure at the base of the liquid core, in particular in the mean P-velocity and in the P-velocity gradient.

This hypothesis is checked using P-wave paths which have their turning points at the base of the liquid core (PKPbc). Data from bulletins are analyzed, the very large number of reported phases all around the world compensates for the relative data scattering. Mantle corrections from tomographic models and various binning procedures are applied to decrease mantle contribution. Maps of P-velocity anomalies are obtained in the 500 km above ICB. No anomaly is detected above 400 km from ICB. A large scale fast anomaly is detected at about 150 km above ICB. Although it is only slightly above the confidence level, it is stable whatever the binning procedure. It suggests that light elements are released in the eastern hemisphere (which is thus freezing one), and that they are trapped at the top of the F-layer at 150km. If confirmed, this result may give strong constraints on the freezing mechanism at ICB and on the viscosity of the F-layer.

### 3.1.5 (o) On the dissipation in the lunar liquid core

Jérôme Noir<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institut für Geophysik, ETH, Zürich, Suisse*

Despite the large amount of data available since the Apollo missions in the 60th, the internal structure of our Moon is poorly constrained. Several observations suggest a liquid Lunar core of about 300-400km, which may be surrounded by a partial melt region. In addition, recent studies argue in favor of a solid growing inner core. An important parameter in these models is the amount of energy dissipated in the liquid core by tidal forcing.

LLR measurements reveal surprisingly large dissipation on long time scale that can not be explained by tidal dissipation in the solid part of the Moon. Hence, it has been proposed that the energy drawn from the

orbit may be deposited in the liquid core by precession, libration and nutations. In the present study, I propose to look at the fluid dynamics driven inside the liquid core of the Moon by precession or libration and to investigate the possible dissipation mechanisms to provide a framework to estimate the deposited power.

### 3.1.6 (o) Rapid dynamics in strongly driven geodynamo simulations with low viscosity

Nathanaël Schaeffer<sup>1</sup>, Alexandre Fournier<sup>2</sup>, Dominique Jault<sup>1</sup>, Julien Aubert<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>IPG Paris

Using an innovative rescaling strategy and efficient spherical harmonic transforms, we have produced a series of geodynamo simulations reaching step by step lower and lower values of viscosity, while maintaining a very strong level of convective forcing. The third and last simulation of that series has many prognostic and diagnostic parameters closer to the Earth's core than any previous geodynamo simulation. In particular the flow is rather turbulent while the magnetic energy dominates the kinetic energy by a factor 5. For the first time, we also show indication that ohmic heating becomes dominant in the energy dissipation budget, as the parameters become more and more Earth-like.

In order to gain insight into the rapid dynamics of the Earth's core (time-scales around the travel time of Alfvén waves, ie a few years for the Earth), we perform a Fourier analysis of the magnetic and velocity fields. This analysis shows that the time-average flow is governed by a thermal wind balance, while the rapid flow is mostly invariant along the rotation axis.

### 3.1.7 (o) Modélisation directe et inverse de la variation séculaire géomagnétique

Julien Aubert<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

Depuis l'avènement du géomagnétisme satellitaire, notre connaissance des variations temporelles du champ géomagnétique s'est considérablement enrichie. Les images satellites ont éclairé en particulier la distribution géographique particulière de ces variations, qui sont hétérogènes en longitude et en latitude. La modélisation numérique directe de la géodynamo est un outil de choix pour explorer l'origine d'une telle distribution. La modélisation numérique inverse, pour sa part, cherche à retrouver les conditions dynamiques du noyau qui expliquent au mieux le champ magnétique actuel et ses variations. Dans cette contribution, je présenterai des travaux récents en modélisation directe qui montrent que la localisation géographique de la variation séculaire est probablement due à l'état des couplages dynamiques entre la graine, le noyau et le manteau de la Terre. Je présenterai aussi des résultats de modélisation inverse qui permettent de reconstruire une histoire dynamique du noyau sur les 170 dernières années.

## 3.2 Les roches basiques et ultrabasi- siques : bilan et perspectives (SFMC)

### Responsables :

- Benedicte Abily (GET, Toulouse)  
benedicte.abily@get.obs-mip.fr
- Mathieu Benoit (GET, Toulouse)  
mathieu.benoit@get.obs-mip.fr
- Michel Grégoire (GET, Toulouse)  
michel.gregoire@get.obs-mip.fr

### Résumé :

Les roches basiques et ultrabasi-ques sont moins répandues à la sur-face du globe par rapport aux autres roches magmatiques et méta-morphiques (basiques, intermédiaires et acides) mais leur étude et les résultats en découlant sont d'une importance capitale dans de nombreux domaines des Sciences de la Terre : magmatisme, métamorphisme, métallogénie, nature et évolution du manteau terrestre mais aussi géo-physique interne et modélisation. Le but de cette session est de réunir les spécialistes des roches basiques et ultrabasi-ques afin de faire un état des lieux de nos connaissances et de définir les directions futures d'investigation.

### 3.2.1 (o) Nouvelles données sur les péridotites serpentinisées du Complexe métamorphique de Champtoceaux (Massif armoricain - France)

Geoffrey Aertgeerts<sup>1</sup>, Christophe Monnier<sup>1</sup>, Jean Pierre Lorand<sup>1</sup>,  
 Didier Lahondère<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LPG, Nantes

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

Le Complexe métamorphique de Champtoceaux appartient à la zone de suture éovarisque sud-armoricaine. L'unité moyenne de cet ensemble est constituée de métagabbros et d'amphibolites associés à des lambeaux de péridotites serpentinisées, interprétés comme les reliques d'un complexe ophiolitique exhumé au cours de la formation de la Chaîne varisque. Sur la bordure nord de cette unité, les péridotites à spinelle des formations de Pont de Barel et de Drain-le Hâvre montrent respectivement un assemblage à pargasite et un assemblage à trémolite. Ces deux formations ont enregistré une serpentinitisation pseudomorphique complète à lizardite accompagnée de nombreuses veines à lizardite et chrysotile associées à une déformation statique (Pont de Barel) ou ultramylonitique (Drain-Le Hâvre). Cependant, contrairement aux péridotites de Pont de Barel, les processus de serpentinitisation de la formation de Drain-le Hâvre a été suivi d'une étape à antigorite qui témoigne d'une seconde serpentinitisation de plus haute température. D'autre part, notre étude a aussi montré que les péridotites de la formation de Drain-le Hâvre ont une composition plus résiduelle ( $Al_2O_3 < 1,18 \text{ wt } \%$  et  $CaO < 0,17 \text{ wt } \%$ ) que celles de Pont de Barel ( $2,43 < Al_2O_3 < 2,71 \text{ wt } \%$  et  $1,56 < CaO < 1,98 \text{ wt } \%$ ), en accord avec les teneurs en chrome analysées dans les spinelles de ces roches ( $0,43 < Cr\# < 0,65$  et  $0,09 < Cr\# < 0,14$ , respectivement). Les données acquises sur les péridotites serpentinisées, appartenant à la bordure nord de l'unité moyenne du Complexe métamorphique de Champtoceaux, montrent donc clairement l'existence de deux anciens corps mantelliques distincts : l'un associé à la formation de Drain-Le Hâvre qui semble correspondre à des péridotites résiduelles déformées à moyenne température (i.e. maximum 550°C pour l'antigorite), alors que l'autre, associé à la formation de Pont de Barel, semble correspondre à des péridotites plus fertiles et hydratées précocement (pargasite in situ ?), qui ne semblent pas avoir enregistré de déformation et d'élévation de température tardives significatives.

### 3.2.2 (o) Les olivines dans les kimberlites : métasomatisme du manteau lithosphérique profond

Carole Cordier<sup>1</sup>, Lucie Sauzéat<sup>1</sup>, Nicholas Arndt<sup>1</sup>,  
 Anne-Marie Boullier<sup>1</sup>, Fabrice Barou<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier

La plupart des kimberlites contiennent d'abondant microxénolithes (nodules) mantelliques et xénocristaux, composés principalement d'olivine. Nous présentons ici une étude géochimique et microstructurale de nodules de kimberlites de type I bien préservées du Groënland. La grande variation compositionnelle des olivines (Fo83 à Fo94) d'un nodule à l'autre contraste avec l'homogénéité de l'olivine dans un même nodule (< 0,5 mol. %). Nous avons défini trois zones chimiques dans les nodules montrant un cœur riche en Fo sur la base des variations de Fo et Ni. (1) Les cœurs des nodules ont des Fo et Ni élevés et constants. (2) Les bordures externes cristallisées à partir du magma kimberlitique ont un Fo constant (Fo88) couplé à une diminution de Ni (de 2500 à 500 ppm). (3) Des zones à gradient chimique, localisées le long des joints de grain ou des plans d'inclusions fluides, ont des Fo variables (Fo93 à

Fo88) mais des Ni globalement constants (de 3000 à 25000 ppm) reproduisant la tendance générale définie par les nodules. L'étude microstructurale de ces zones suggère qu'elles résultent d'une migration de joint de grain ou d'une dissolution-cristallisation en présence d'un fluide et contemporaine d'une déformation au sein du manteau. Elles se formeraient lors de la réaction de la péridotite mantellique avec un fluide riche en CO<sub>2</sub>, processus faisant disparaître le pyroxène et le grenat. Ainsi, la variation de composition de l'olivine enregistre la position de l'échantillon par rapport aux zones riches en fluides que sont les joints de grain pour les zones à gradient chimique et les chenaux plus importants pour des variations à plus grande échelle enregistrées dans les différents nodules. Cette conclusion implique que les processus métasomatiques qui produisent la variabilité en composition de l'olivine et qui font disparaître le pyroxène et le grenat de la péridotite initiale, accompagnent une déformation et se produisent dans le manteau lithosphérique et non dans le magma kimberlitique pendant son ascension vers la surface.

### 3.2.3 (o) Les diagrammes de phases métastables : un outil pour quantifier la vitesse de refroidissement des laves

Francois Faure<sup>1</sup>, Laurent Tissandier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

La majorité des roches volcaniques montre des textures de déséquilibres (verre, cristaux squelettiques ou dendritiques). Ces textures de déséquilibre sont interprétées comme résultant d'un fort degré de surfusion (-DT). Par définition, -DT correspond à la différence entre la température liquidus et la température réelle. Cependant, la température liquidus évolue au cours de la cristallisation à cause du changement continu de la composition du liquide résiduel. Cela a amené à considérer dans les expériences de cristallisation dynamique réalisées dans des conditions de déséquilibre important (vitesses de refroidissement élevées) un degré de surfusion nominal (-DT<sub>n</sub>). Le paramètre -DT<sub>n</sub> étant défini comme la différence entre la température liquidus de la composition initiale et la température à la fin de l'expérience. Cependant, ce paramètre est une simplification exagérée lorsque la vitesse de refroidissement est relativement faible et il est alors très éloigné du degré de surfusion réel. D'autre part, l'utilisation des diagrammes de phases pour contraindre les compositions chimiques de ces phases hors équilibres est impossible car les diagrammes de phases classiques sont par définition à l'équilibre. Pour s'affranchir de ce problème, nous proposons une méthode basée sur l'utilisation des inclusions magmatiques pour déterminer la prolongation métastable des courbes liquidus sous le solidus.

Les résultats expérimentaux qui seront présentés permettront de valider la méthode et mettront l'accent sur les paramètres qui permettent de réaliser des diagrammes de phases métastables. En particulier, ils mettent en évidence le rôle du degré de surchauffe qui, en inhibant la nucléation, permet d'atteindre des domaines non encore explorés des relations de phases. L'utilisation de ces diagrammes pour déterminer les degrés de surfusion, ou de sursaturation, ainsi que leurs applications en terme de « géospeedomètre » sera également discutée.

### 3.2.4 (o) Petrology and geochemistry of ultramafic and mafic rocks emplaced within the anatectic series of the variscan Pyrenees : example of the Gavarnie-Heas dome, west Pyrenees (France)

Mohammad Kilzi<sup>1,2</sup>, Michel Grégoire<sup>1</sup>, Mathieu Benoit<sup>1</sup>, Youssef Driouch<sup>3</sup>, Valérie Bosse<sup>4</sup>, Michel De Saint Blanquat<sup>1</sup>, Pierre Debat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Département de Géologie, Faculté des Sciences, Université d'Alep, Syrie

<sup>3</sup>Département de Géologie, Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Fès, Maroc

<sup>4</sup>LMV, Clermont-Ferrand

The evolution of mafic and ultramafic (MUM) metamagmatic rocks occurring within the anatectic crust of the Pyrenees during the Variscan orogeny is investigated from their occurrences in the Gavarnie-Heas structuro-metamorphic dome. Those rocks constitute three massifs : - the Gloriettes massif consisting of norites including enclaves of ultramafic rocks ; - the Troumouise and Aguila massifs consisting of diorite including enclaves of norites and hornblendites. MUM rocks are more or less affected by the regional metamorphism. The geochemical characters show that the evolution of the MUM series is not consistent with a simple fractional crystallization process. The Sr and Nd isotopic signatures indicate that all the samples display a continental crust signature and display no evidence of a mantle component. Trace elements vs isotopic correlations suggest that the MUM rocks are witnesses of an heterogeneous source, and correspond to restite+melt lithologies, which were later affected by the regional metamorphism. In this scenario, the diorites result from the fractional crystallisation of this two-component melt. From field, structural, petrological, geochemical and metamorphic constraints the evolution of the MUM rocks associated with the migmatites is integrated in a model corresponding to the formation and the uplift of a regional dome with successively : - prior to the Variscan orogeny emplacement of basic series in the lower crust ; - during the Westphalian time development of a thermal anomaly leading to partial melting in the granulitic crust and formation of metasomatized liquids ; transport of basic melts + UM and norite residues in one hand and more felsic liquid in the other hand from lower level to the middle crust where extensive anatexis developed ; - alteration of norites by anatectic processes ; - fractionated crystallization of the melts coming from the melting of metasediments and crystallization of the diorites dated at 294 Ma.

### 3.2.5 (o) Nature and evolution of the lithospheric mantle beneath the Hoggar swell (Algeria) : a record from mantle xenoliths

Fatna Kourim<sup>1,2,3</sup>, Jean-Louis Bodinier<sup>2</sup>, Olivier Alard<sup>2</sup>, Alain Vauchez<sup>2</sup>, Jean-Louis Bodinier<sup>2</sup>, Abderrahmane Bendaoud<sup>3</sup>, Jean-Marie Dautria<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Chrono-environnement, Besançon

<sup>2</sup>Geosciences Montpellier

<sup>3</sup>Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie

We present the results of an integrated petrological, geochemical and petrophysical study of mantle xenoliths sampled by Cenozoic volcanism in the Hoggar massif (Algeria). The samples were collected in two volcanic districts (Tahalgha and Manzaz) located at the periphery and in the central part of the Hoggar massif, respectively. The Tahalgha sampling also straddles a mega pan-African shear zone (the 4°35' fault) between two major structural domains of the Tuareg Shield basement : the Central Polycyclic Hoggar to the East (LATEA terranes) and the Western Hoggar domain to the West (Iskel block). The studied xenoliths provide information on the evolution of the lithospheric mantle from the late Pan-African orogeny up to the Cenozoic events responsible for the topographic upwelling and volcanism. The Pan-African heritage is preserved in xenoliths from the peripheral Tahalgha district. These samples are distinguished by low equilibrium T (750-900°C) and LREE-depleted

clinopyroxene compositions. They are considered to represent the sub-continental lithosphere after the rejuvenation processes that occurred during the late stages of the Pan-African orogeny. They show well preserved deformation textures assigned to these events and characterized by preferential crystallographic orientations (CPOs) of olivine (axial-[010]) consistent with a transpressional regime. The Cenozoic events are marked by partial annealing of these textures, particularly pronounced in the Manzaz samples, as well as in the Tahalgha xenoliths equilibrated at medium to high T (900-1150°C). The Cenozoic events were also responsible for a change in olivine CPOs. However, the first-order lithosphere modifications ascribed to the Cenozoic event are observed either at the scale of the whole Hoggar swell, or at the small scale of magma conduits and their wall rocks. Conversely, our data show little changes at intermediate scales on either sides - or at different distances - from the 4°35'. As regards the origin of the Hoggar volcanic swell, this result favours relatively large-scale asthenospheric upwelling related to upper mantle instabilities or local convections, rather than a process involving merely the reactivation of pan-African lithospheric faults.

### 3.2.6 (o) Archean ultramafic-mafic-anorthositic layered complexes with emphasis on Mauritanian examples

Julien Berger<sup>1</sup>, Hervé Diot<sup>2</sup>, Khalidou Lo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>LPG, Nantes

<sup>3</sup>Université de Nouakchott, Mauritanie

Archean ultramafic-mafic-anorthositic complexes (UMAC) are a frequent component of cratonic terrains. The most representative UMAC is the 2.97 Ga Fiskenaasset complex in Western Greenland, but similar bodies have been described in the Dahrwar craton of India, Limpopo belt in South Africa, Superior Province in Canada and recently in the West African craton in Mauritania. All these complexes are exposed in high-grade (amphibolite to granulite) gneissic terrains in close spatial association with supracrustals (BIFs, cipolin, amphibolites). They are formed by metamorphosed layered sequences of igneous peridotite, chromitite, troctolite, gabbro and megacrystic anorthosite with small amounts of hornblendite (generally percolating ultramafic rocks). In the Archean Amsaga domain of the West African craton, the metamorphic assemblages attest for conditions up to 900°C and 5 kbar. UMACs in Mauritania have been also strongly affected by at least two phases of Archean deformation, comprising late Archean transpression marked by strike-slip shear zones and vertical folds. The original geometry of the intrusions can thus not be reconstructed with precision, but the small thickness of these layered bodies and the presence of trondhjemite xenoliths argue for small and narrow intrusions within pre-existing TTG-dominated crust. Trace-element and isotopic (Nd-Hf) data have been used to propose an oceanic arc context for the formation of these complexes in Greenland but new data on the Amsaga domain do not support this view. A depleted mantle component was clearly involved in the genesis of the UMACs but recycled zircons from host TTGs and the presence of magmas with radiogenic Nd and Hf signatures compared to the chondritic references suggest that they have intruded a pre-existing felsic crust. These complexes cannot be compared to oceanic arcs, they are instead basic inputs in a mature felsic crust and can be the early igneous expression associated with high temperature metamorphism.

### 3.2.7 (o) Mineralogical changes and characterization of redox conditions during antigorite breakdown in subduction settings

Margarita Merkulova<sup>1</sup>, Manuel Munoz<sup>1</sup>, Olivier Vidal<sup>1</sup>, Fabrice Brunet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

Mineralogical and petrological changes in subduction zones include transitions from altered hydrated rocks (mostly serpentinites) to anhydrous peridotites with releasing fluid. If the P-T conditions of dehydration/dehydroxylation of minerals in subduction zones are relatively well known, changes in valence of iron and other ions capable for electron-exchanges remain poorly constrained (Manning, 2011).

Ulmer and Trommsdorff were first who showed the most representative diagram of antigorite breakdown in subduction zones (Ulmer & Trommsdorff, 1995). Detailed experiments with two chemical systems are carried out in the present work. The experiments are based on using press piston-cylinder and a hydrothermal diamond-anvil cell for characterizing in-situ reactions. Characterization of mineral phases is based on X-ray diffraction, microprobe analyses and X-ray absorption spectroscopy.

Series of experiments at temperatures from 550 to 850°C at pressure of 2 GPa perform the antigorite dehydration reaction. Thermodynamic modeling helps to adjust the most appropriate duration of experiments.

As the reaction progress with temperature the evolution of the iron oxidation state changes during the intermediate stages of the reaction. Antigorite containing mostly Fe<sup>3+</sup> releases water and breaks down into olivine and enstatite. In reality the reaction is much more complicated due to additional elements in the natural system such as Al and Ca, for this reason chlorite containing Fe<sup>3+</sup> and diopside are observed. The presence of Fe<sup>3+</sup> at high temperatures is a fact of partly oxidized conditions after antigorite breakdown. Characterizing the evolution of elements' valence states and dehydration reactions deduce the processes occurring in the subduction zones, including seismic control and ore-forming fluids (Pokrovski & Dubrovinsky, 2011).

References

Pokrovski G.S., Dubrovinsky L.S., 2011, The S<sup>3+</sup> ion is stable in geological fluids at elevated temperatures and pressures. *Science*, v. 331, p. 1052-1056.

Manning C.E., 2011, Sulfur surprises in deep geologic fluids. *Science*, v. 331, p. 1018-1019.

Ulmer P., Trommsdorff V., 1995. Serpentine Stability to Mantle Depths and Subduction-Related Magmatism. *Science*, 268, 858-861.

### 3.2.8 (p) Petrology and geochemistry of mantle xenoliths of the Neogene-Quaternary Middle Atlas Volcanic Field (Morocco)

Bertrand Arnoux<sup>1</sup>, Bénédicte Abily<sup>1,2</sup>, Mathieu Benoit<sup>1</sup>, Nasrddine Youbi<sup>3,4</sup>, Farida Ait-Hamouh<sup>5</sup>, Michel Grégoire, A. Idris<sup>3</sup>, M.A. Boumehdi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>GEMOC ARC National Key Centre, Department of Earth, Planetary Sciences Macquarie University, Australie

<sup>3</sup>Geology Department, Faculty of Sciences-Semlalia, Marrakech, Maroc

<sup>4</sup>Departamento de Geologia, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Centro de Geologia, Lisboa, Portugal

<sup>5</sup>Département de Géologie, Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire, Alger, Algérie

The present study focuses on the mantle xenoliths from The Middle Atlas which corresponds to a mountain chain lacking a crustal root a characteristic related to lithospheric and asthenospheric processes occurring during the compressive phase. The xenoliths were brought to the surface by Neogene - Quaternary alkaline lavas emplaced during the crustal thinning phase that took place before the compressive phase. In order to better constrain the nature and evolution of the lithospheric sub-continental mantle, we have conducted a petrological and geochemical study on 15 selected representative xenolith samples from the Tafraout area. The study of primary mineral phases of those mantle xenoliths evidences that the lithospheric sub-continental mantle is heterogeneous consisting mostly of lherzolites with minor harzburgites and pyroxenites including a garnet-bearing websterite. All the peridotites are spinel bearing rocks coming from the spinel peridotitic mantle stability field corresponding to a pressure ranging from 7 to 22 kbar, i.e. a depth ranging from 25 to 100 km. Finally the garnet-bearing websterite also originates from the same lithospheric mantle zone as evidenced by its temperature and pressure of equilibration, ranging from 700 to 900°C and close to 1.2 GPa, respectively. Three main petrogenetic processes explain the observed upper mantle heterogeneity : (1) A partial melting event evidenced for example by the high #Mg of primary silicates (CPX, OPX, OL) commonly >90, (2) A mantle metasomatic event related to the circulation of mafic silicated alkaline melts more or less enriched in CO<sub>2</sub>. This event is evidenced by the LREE enrichment of peridotitic CPX and by the crystallization of new mineral phases such as amphibole and secondary CPX, finally (3) A magmatic event leading to the crystallization within the upper mantle of mafic silicated alkaline melts highlighted by the formation of pyroxenites.

### 3.2.9 (p) Les chromites podiformes : Minéralogie, Géochimie et Platinoïdes associés dans l'ophiolite néoprotérozoïque de Bou Azzer (la boutonnière de Bou Azzer - El Grâara, Anti-Atlas central, Maroc)

Mohamed Bhilisse<sup>1</sup>, Amina Wafik<sup>1</sup>, Hassan Admou<sup>1</sup>, Lhou Maacha<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire dynamique de la lithosphère et genèse des ressources minérales et Energétique, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc

<sup>2</sup>Groupe MANAGEM, Maroc

Les gisements de chromite associés aux ophiolites de Bou Azzer, correspondent à des chromitites podiformes concentrées dans la partie Est de la boutonnière Bou Azzer-El Grâara. Elles se présentent sous forme de petits corps losangiques orientés et à la croisée d'un système de fractures traduisant leur mode de mise en place. La tectonique qui affecte ces corps est polyphasée. La phase synchrone à leur mise en place est transtensive, comme en témoignent les formes de « Pulls Apart » commune aux pods et des textures bréchiques relevées au microscope métallographique et au MEB (microscope électronique à balayage) et antérieures à la serpentinitisation. Cette tectonique contrôlerait également le système de dyking auquel les pods de chromitite sont associés.

La distribution des gisements le long de la boutonnière de Bou Azzer montre une zonalité régionale, un enrichissement en chrome à l'Ouest (52 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et un appauvrissement vers l'Est (30 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La chromite massive est la plus chromifère et titre jusqu'à 62 % en Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> avec un enrichissement en magnésium et un appauvrissement en fer trivalent. La chromite disséminée peut être subdivisée en deux types. La chromite disséminée podiforme s'apparente à la chromite massive en contexte géologique et en mode de mise en place est relativement plus pauvre avec des teneurs en Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en dessous de 50 %. Le second type regroupe la chromite et les chromospinelles disséminés dans les serpentines et en association avec les sulfures et les arséniures de nickel. C'est

de loin le plus répandu mais la teneur moyenne est de 14 %. les chromitites de Bou Azzer se caractérisent par un faible rapport [P-PGE / I-PGE] typique des chromitites ophiolitiques de type alpin, pauvres en sulfures, avec prédominance des I-PGE, des teneurs variables en Rh, et de faibles teneurs en Pt et Pd. La somme des teneurs en (PGE) des chromitites d'Inguejem-Aït Ahmane est d'environ 187-221 ppb.

### 3.2.10 (p) Pigeonites et orthopyroxènes au sein de cumulats gabbroïques dans des dépôts du Piton Chisny (Ile de La Réunion) : nouvel apport à la pétrologie des roches basiques réunionnaises

Yann Brugier<sup>1</sup>, Michel Pichavant<sup>1</sup>, Andrea Di Muro<sup>2</sup>, Jean-Louis Bourdier<sup>1</sup>, Patrick Bachelery<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>IPG Paris

<sup>3</sup>LMV, Clermont-Ferrand

Le Piton de la Fournaise (PdF) émet en majorité des basaltes transitionnels (Steady State Basalt, SSB) ainsi que des océanites (SSB enrichi en phénocristaux d'olivine) et plus épisodiquement, des laves « anormales » montrant des caractéristiques géochimiques contradictoires. Une étude pétrologique est en cours pour construire les diagrammes de phases et de déterminer les séquences de cristallisation pour les SSB et les laves anormales. Au cours de cette étude, des xénolithes mafiques (dunites, wehrlites et gabbros) récoltés dans des produits de la Plaine des Sables (dunites, wehrlites : Piton Chisny & Haïy / Gabbro : Piton Chisny) ont été analysés. Ces enclaves sont des cumulats provenant de la cristallisation de réservoirs basaltiques présents sous les édifices. Leur étude permet de proposer une séquence de cristallisation qui peut être ensuite confrontée aux résultats expérimentaux d'équilibres de phases. Ces cumulats sont pour certains (dunites et wehrlites) décrits dans des travaux antérieurs. Le gabbro est lui composé de phénocristaux (quelques mm à cm) de plagioclase (Plag) : An<sub>80</sub> -> 60, et de clinopyroxène (augite) ; le Plag pouvant apparaître localement en cristaux plus petits. Au sein des phénocristaux de Plag, des inclusions d'olivine sont observées, ainsi que des inclusions de pigeonite : Wo<sub>6</sub>-14 En<sub>74</sub>-68 Fs<sub>19</sub>-15, d'orthopyroxène (Opx) : Wo<sub>2</sub> En<sub>80</sub> Fs<sub>18</sub>, et d'olivine au sein des augites. Une texture « striée » marquée par des exsolutions d'Opx se rencontre dans certaines augites. Le type de séquence cumulative et les variations de composition des phases permettent de proposer une séquence de cristallisation pour les anciens magmas du PdF : olivine (+ spinelle) -> clinopyroxène -> Plag. Les pigeonites et Opx du gabbro résulteraient d'une rééquilibration subsolidus du clinopyroxène. La mise en évidence d'Opx et de pigeonite dans ce gabbro complète les quelques descriptions existantes sur ces phases au PdF (Kornprobst et Bachelery, 1984).

### 3.2.11 (p) Melt-Peridotite Reactions in the Upper Mantle, Revealed From the Geochemistry of Peridotite and Pyroxenite from the Beni-Boussera Massif, Morocco

Kamar Chetouani<sup>1,2</sup>, Carlos J. Garrido<sup>2</sup>, Isma Amri<sup>1</sup>, Jean-Louis Bodinier<sup>3</sup>, Kamal Targuisti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de l'Environnement et des Ressources Naturelles, Université Abdelmalek Essaâdi, Faculté des Sciences de Tétouan, Maroc

<sup>2</sup>Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, Granada, Espagne

<sup>3</sup>Géosciences Montpellier

Mafic layers embedded in mantle peridotites from Beni Bousera massif represent a diffuse lithological heterogeneity. They have been interpreted to represent precipitates from melts related to surrounding peridotites. They are not distributed randomly in the massif, but in seiland and ariegite sub-facies. Whereas Type 1 garnet pyroxenites outcrop in ariegite, type 2 garnet-spinel pyroxenites at the transition between ariegite and seiland, type 3 olivine bearing spinel websterites, type 4 spinel-chromium websterites crop out in the seiland sub-facies. They display wide petrographic and geochemical variations. These variations observed in the scale of the entire massif are due to a lithospheric heating. During this latter, garnet pyroxenites were the subject of fractionation ; consequently they released a residual basaltic melt. Accordingly, it's the interaction of this melt with the peridotites in mantle that we call « metasomatic reaction ». Thus, this process is proposed here in order to explain the formation of the assemblage pyroxenites-peridotites. 3 evidences are supporting the latter process : i) petrographic observation where the textures experienced change during melt impregnation ii) existence of crystallization front, and iii) the opposite trends of LREE enrichments in peridotites vs LREE depletion in pyroxenites, respectively. These indicate the peridotites underwent local changes of their primary residual composition due to infiltration of basaltic magma. The changes in the chemical composition of the peridotites are especially marked by LREE enrichment, implying that this process led to the re-equilibration of the peridotite minerals with the basaltic magmas. Whereas, we suggest that this LREE enrichment in the wall rock peridotites is probably due to a diffusional exchange between pyroxenites and peridotites which occurred as veins during the crystallization. Thus the Beni Bousera peridotites were modified by the so called « metasomatic reactions », a distinct feature resulted by percolation of the magma through the refractory lherzolite. Structural, mineralogical, textural, and trace elements-based geochemical data shed light on this petrogenetic processes, which were defined primarily in orogenic massifs e.g. (Ronda & Lherz), to explain the melt-rock interaction in the mantle.

### 3.2.12 (p) Ultramafic and mafic rocks emplaced within the granulitic series of the variscan Pyrenees : example of the Castillon massif

Mohammad Kilzi<sup>1,2</sup>, Mathieu Benoit<sup>1</sup>, Michel Grégoire<sup>1</sup>, Youssef Driouch<sup>3</sup>, Valérie Bosse<sup>4</sup>, Michel De Saint Blanquat<sup>1</sup>, Louis Roux<sup>1</sup>, Pierre Debat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Département de Géologie, Faculté des Sciences, Université d'Alep, Syrie

<sup>3</sup>Département de Géologie, Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Fès, Maroc

<sup>4</sup>LMV, Clermont-Ferrand

Within the granulitic crust of some North Pyrenean Massifs (Agly, Saint Barthelemy, Castillon, Ursuya...) occur sills of ultramafic (UM) and mafic (M) rocks metric to hectometric in size. In southern part of Castillon (sector of Couret du Loup) these rocks appear included within cordierite- and garnet leptynites and kinzigites. Ultramafic rocks (UM) occur in the lower part of the section and consist of dunites, peridotites, in addition to orthopyroxenite and hornblendite forming millimetric to centimetric layers within peridotites. These rocks show a cumulate texture and consist of (olivine (Fo<sub>0.89</sub>) ; orthopyroxene (En<sub>92</sub>) ; magnesiohornblende with XMg<sub>0.86</sub> and spinel). Mafic rocks mostly occur from the median part to the upper of the section and consist of norite including layers of gabbro-norite, gabbro and amphibolite. Norite minerals have a composition of orthopyroxene (En<sub>54-65</sub>), plagioclase An<sub>82-88</sub>, and amphibole (edenites- magnesio-hastingsites with XMg<sub>70</sub>). Gabbro-norite and gabbro nearly show the same mineralogical composition with in addition some clinopyroxene (diopside-Wo<sub>45-49</sub>.7En<sub>36.7</sub>-

39.8Fs10-15) and anorthite (An90-95). Amphibolite consist of amphibole (edenite- magnesio-hastingsite with XMg0.75) and plagioclase (An90). In the upper part of the section amphibolites have Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> rich-amphibole (15%) and anorthite (An95) including sapphirine, spinel and corundum-bearing layers. Sapphirine layers display euhedral corundum bordered by a corona of spinel and of sapphirine, pargasite (XMg0.95), plagioclase (An95) and late poikilitic lath of gedrite. The geochemical analysis (major elements and REE) evidence the peculiarities of the sapphirine-bearing rocks : high Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30 wt%), and MgO (18 wt%) contents, low SiO<sub>2</sub> (12 wt%) and FeO<sub>total</sub> (4 wt%) contents and shape of REE patterns. These characteristics question the magmatic evolution of this UM and M series (differentiation, metasomatism...) and particularly the problem of the formation of the sapphirine-bearing rocks.

### 3.2.13 (p) Zoisite-grossular exsolutions in omphacite of corundum-bearing eclogite from Siberian craton

Bertrand Moine<sup>1</sup>, Ioana Bogdana Radu<sup>1</sup>, Andrey Korsakov<sup>2</sup>, Gelu Costin<sup>3</sup>, O.b. Oleinikov<sup>4</sup>, Alexander Golovin<sup>2</sup>, Dmitri Ionov<sup>5</sup>

<sup>1</sup>LMV, Saint-Etienne

<sup>2</sup>V S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Novosibirsk, Russie

<sup>3</sup>Department of Geology, Rhodes University, Afrique du Sud

<sup>4</sup>Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russie

<sup>5</sup>Géosciences Montpellier

Four new samples of corundum-bearing eclogites from the Obnazhennaya kimberlite pipe in the northern Siberian craton contain clinopyroxene with exsolution lamellae. This type of texture, which is rare in mantle eclogites, reflects changes in P-T conditions (e.g. decreasing temperature and/or increasing pressure). The primary mineralogical assemblage of these eclogites is omphacite-garnet-corundum±kyanite. The clinopyroxene is usually poikiloblastic (1-2 cm) with euhedral inclusions of corundum (1-2 mm) and garnet (1-2 mm). Late-stage minerals form coronas around garnet with rare grains of kyanite around corundum. The clinopyroxene shows numerous fine exsolution lamellae of grossular-rich garnet and zoisite oriented along crystallographic planes. The major element compositions of minerals vary greatly between primary phases and exsolution lamellae in the same sample. The compositions of clinopyroxenes and garnets place these eclogites in group B with an extension to group A for clinopyroxenes and group C for garnets. The clinopyroxenes range broadly in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (6-19 wt%), but not in Na<sub>2</sub>O, which remains constant and relatively low (~ 4wt%). By comparison, MgO (7-13 wt%) and Na<sub>2</sub>O in clinopyroxene are negatively correlated. The calculated temperature ranges from 950 to 1100°C and pressures from 4 to 4.7 GPa. These conditions are significantly higher in T and lower in P than those calculated in the central Siberian craton (Udachnaya) for type B eclogite. This raises the question if zoisite, a hydrous mineral (~ 1.7 wt% H<sub>2</sub>O), can be stable in these rocks at these P-T conditions. Thermodynamic Theriak-Domino simulations show that zoisite may be stable below 4.5 GPa and at higher temperatures than those in the literature (<1250°C) if it coexists with a melt. It can be also inferred that the exsolutions of grossular and zoisite can be explained by reaction of the exsolved Ca-Tschermak molecule of omphacite with a pervasive hydrous melt.

### 3.3 Dynamique des systèmes magmatiques intrusifs et extrusifs, et leurs relations avec la tectonique et la géodynamique (CNFGG)

#### Responsables :

- Bruno Scaillet (ISTO, Orléans)  
bruno.scaillet@cnrso-orleans.fr
- Thierry Menand (LMV, Clermont Ferrand)  
t.menand@opgc.fr
- Jean-Luc Froger (LMV Clermont-Ferrand)  
j.l.froger@opgc.univ-bpclermont.fr
- Gaëlle Prouteau (ISTO, Orléans)  
gaelle.prouteau@cnrso-orleans.fr
- Michel de Saint Blanquat (GET, Toulouse)  
michel.desaintblanquat@get.obs-mip.fr

#### Résumé :

Le magmatisme est le processus responsable de la formation des croûtes continentale et océanique. C'est le principal vecteur des transferts de matière et de chaleur à l'échelle planétaire, du manteau vers la croûte, mais aussi vers l'atmosphère (émissions de gaz et de cendres volcaniques) et vers l'hydrosphère (hydrothermalisme océanique). Il s'exprime par la cristallisation de plutons en profondeur et par l'effusion plus ou moins violente de produits volcaniques à la surface. Les travaux récents montrent que les systèmes intrusifs et extrusifs partagent des caractéristiques communes (diversité chimique, différenciation à la source, échelles de temps et d'espace, relations avec la tectonique) et que, dans les arcs et les rifts au moins, les systèmes intrusifs et extrusifs sont pilotés par les mêmes processus profonds (concept de Deep Hot Zone). Toutefois, malgré ces caractéristiques communes, il est également montré que le plus souvent les corps intrusifs ne sont pas simplement des chambres magmatiques fossiles ayant alimenté des systèmes effusifs, et les travaux sur l'évolution des volcans actifs montrent qu'ils sont alimentés par des chambres magmatiques éphémères et de petites taille, elles-mêmes alimentées par des magmas déjà différenciés. Tous ces nouveaux développements montrent que les magmatismes intrusif et effusif doivent être considérés ensemble. À l'heure où l'utilisation de techniques de surveillance à distance des systèmes volcaniques, telles que l'InSAR, ne fait que s'accroître, des questions telles que la nature et l'évolution des chambres magmatiques, le lien entre les systèmes intrusifs et effusifs, leurs relations avec la tectonique et le contexte géodynamique, ou encore les flux magmatiques et la croissance crustale, restent d'actualité. En réunissant les spécialistes du magmatisme continental, intrusif et effusif, cette session a pour objectif de faire le point sur les recherches portant sur l'origine, la composition, la structure, l'évolution et la dynamique des systèmes magmatiques à partir d'études sur les systèmes naturels, actuels ou fossiles, expérimentaux, numériques ou encore théoriques.

### 3.3.1 *Keynote communication* : **Crustal magmatism and differentiation : a heat and mass balance perspective**

Catherine Annen<sup>1</sup>, Jon Blundy<sup>1</sup>, Julien Leuthold<sup>1</sup>, Elena Melekhova<sup>1</sup>, Steve Sparks<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*School of Earth Sciences, University of Bristol, Royaume-Uni*

The size and longevity of magma chambers and melt reservoirs are controlled by the balance between magma input and heat loss, which depends on the geometry of the cooling body and on background temperatures. Field observations suggest that igneous bodies grow incrementally by addition of magma sheets, most often sills. The growth of magma chambers or melt reservoirs larger than one single sheet depends on the sheet emplacement rate. Building a small chamber that feed an arc stratovolcano requires magma fluxes one to several orders of magnitude lower than building a giant chamber able to feed ignimbrite caldera-forming eruptions. A series of observations that include different geochronological techniques, geodetic data and numerical simulation suggest that magma fluxes in the upper crust vary over several orders of magnitude. Large magma chambers may form during transient episodes of exceptionally high magma fluxes.

The generation of silicic melts by differentiation of a mafic magma or by partial melting of a crustal protolith requires large volumes of mafic magmas either as a parent or as a heat source. Low temperatures in the upper crust limit the size and longevity of melt reservoirs and the mass balance between mafic and silicic rocks in the upper crust does not support in-situ generation of silicic melts. Most crustal differentiation is likely to take place in the lower crust where temperatures are higher and compositions are mafic. Coupling of experimental petrology and numerical simulation shows that a wide diversity of melt compositions can be generated in long-lived deep hot zones where mafic magma from the mantle is accumulating. Different timescales for melt extraction and transport and threshold effects may partly explain the episodicity of magma transfer from the lower to the upper crust.

### 3.3.2 (o) **Magmatic differentiation of h a yne/nosean-pyrrhotite-bearing phonolite (Saghro, Morocco and Laacher See, Germany)**

C elina Baudouin<sup>1</sup>, Fleurice Parat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Géosciences Montpellier*

Phonolites are alkaline silica-undersaturated lavas mainly present in intraplate setting. To constrain their differentiation from nephelinite, we performed a petro-geochemical study of phonolite from Saghro (Morocco) and Laacher See (Germany). Although phonolites from both localities have different silicate mineral assemblage and bulk composition (Eifel phonolites are Si-K-rich compare to Saghro phonolite - 58.7 and 52.8 wt% SiO<sub>2</sub> and 0.6 and 1.4 Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O, respectively) both have h a yne/nosean and pyrrhotite + silicate minerals that allow us to constrain the pre-eruptive conditions and differentiation of phonolites. Phonolites from Saghro have cpx, sanidine, nepheline, kaersutite, titanite, magnetite, pyrrhotite, nosean (7.8-8.8 wt% SO<sub>3</sub>; 1-1.1 wt% Cl) and F-apatite (<0.04 wt% SO<sub>3</sub>). Mineral compositions (in situ trace elements of cpx, nosean, apatite and pyrrhotite) indicate closed-system fractional crystallisation. Nosean-bearing phonolitic melt is in equilibrium with cpx at P=2.8-3.2 kbar and T=925-950 C. The co-crystallisation of nosean and pyrrhotite constrain the fO<sub>2</sub> at NNO-NNO+1.

Phonolites from Eifel have cpx, sanidine, plagioclase, h a yne (13.7-13.9 wt% SO<sub>3</sub>, 0.4 wt% Cl), kaersutite, titanite, magnetite, F-apatite (0.7-0.9 wt% SO<sub>3</sub>) and rare pyrrhotite. The composition of minerals

constrain the evolution to a closed-system with equilibrium conditions at P=2-2.5 kbar and T=760-850  C. The high amount of h a yne and rare pyrrhotite suggest a high fO<sub>2</sub> (fO<sub>2</sub>>NNO+1).

Mineral composition and modal proportion of sodalite-group minerals and pyrrhotite in phonolite indicate a volatile-rich liquid (H<sub>2</sub>O, S, F, Cl). Our studies agree with previous conclusions for closed-system fractional crystallisation from nephelinite. The geochemical difference is explained by different pre-eruptive conditions (T, fO<sub>2</sub> and volatile content, e.g., Smelt=0.15-0.3 wt% and <0.1 wt% for Eifel and Saghro, respectively (Dap/melt)) leading to nosean-nepheline or h a yne-plagioclase crystallisation.

### 3.3.3 *Keynote communication* : **Le batholite côtier dans la région d'Arequipa : enregistrement à long terme de l'activité de l'arc sud-péruvien**

Sophie Demouy<sup>1,2</sup>, Mathieu Benoit<sup>1</sup>, Michel De Saint Blanquat<sup>1</sup>, Jérôme Ganne<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*GET, Toulouse*

<sup>2</sup>*Université des Antilles et de la Guyane, Pointe-à-Pitre*

Les batholites constituent l'enregistrement d'une évolution magmatique qui peut durer plusieurs dizaines de millions d'années. L'étude de l'évolution de leur signature géochimique complexe et sa compréhension en termes de processus pétrogénétique est cruciale pour la compréhension du fonctionnement des arcs et de la croissance crustale associ e. La section d'Arequipa du batholite côtier du sud du Pérou s'est mise en place du Jurassique au Paléocène (200-175 Ma, et 90-60 Ma) au cours de plusieurs épisodes discontinus d'activité magmatique d'intensité variable (Demouy et al., 2012).

Les données thermobarom etriques indiquent que le batholite s'est construit à deux niveaux principaux, le plus profond entre 5 et 7 km et le second à environ 3,5 km de profondeur. L'affleurement de ces différentes unités à la même altitude aujourd'hui montre l'existence probable de mouvements verticaux associ es à la construction du batholite. Les données géochimiques montrent une grande variabilité, mais s'accordent avec une évolution en deux étapes de l'arc magmatique, inspir e par le modèle de MASH : ( i ) un stade pr eoc e domin e par l'hybridation et les processus de cristallisation fractionn e, et ( ii ) un stade avancée dans lequel les magmas ont été homog en es et évoluent principalement par cristallisation fractionn e. Le passage d'une étape à l'autre est contr ol e par l'état thermique de la croûte profonde et de l'interface croûte-manteau.

### 3.3.4 (o) **G en e et évolution des magmas carbonatitiques et de leurs magmas silicat es associ es :  tude pétro-géochimique d'échantillons du volcan Oldoinyo Lengai, Tanzanie**

Gaëlle Mollex<sup>1</sup>, Lydéric France<sup>1</sup>, Pete Burnard<sup>1</sup>, Francois Faure<sup>1</sup>, Andreas Pack<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*CRPG, Nancy*

<sup>2</sup>*Georg-August-University, Göttingen, Allemagne*

Les laves carbonatitiques sont rares à la surface de la Terre par rapport aux magmas silicat es des séries classiques. De nombreuses études ont été faites afin de contraindre la source mantellique et la g en e de ces laves atypiques, notamment dans le but de comprendre leur enrichissement en terres raresREE. Cependant, cela reste encore en débattu aujourd'hui. Le volcan Oldoinyo Lengai (rift Est Africain, Tanzanie)

est le seul volcan à émettre actuellement des laves natrocarbonatitiques. L'objectif de ce projet est de comprendre la genèse et l'évolution de ces magmas alcalins à fort potentiel économique, ainsi que de connaître le fonctionnement et l'organisation du système magmatique présent à l'Oldoinyo Lengai. Une série de xénolites émis lors de l'éruption explosive de 2007-2008, récoltés sur les flancs du volcan, nous permettent d'apporter de nouvelles contraintes aux modèles existants. La pétrologie des enclaves indique qu'elles sont des cumulats de bordure de chambre magmatique (mushy zone) ; elles permettent donc une étude directe des processus qui ont lieu au sein de la chambre. Tous les minéraux présents contiennent des inclusions magmatiques, permettant ainsi de remonter au liquide initial et de suivre l'évolution des compositions au cours de la différenciation. Le moment où le processus d'immiscibilité et l'enrichissement en REE associé se produisent est identifié par la présence de globules carbonatitiques piégés dans ces inclusions magmatiques. Les expériences en platine microthermométrie permettent de déterminer une température de fusion d' $\sim 350^\circ\text{C}$  du liquide carbonatitique, alors que le liquide silicaté fond à  $800-850^\circ\text{C}$ . L'homogénéisation totale des inclusions magmatiques n'est pas possible, mais le processus d'immiscibilité est identifié comme se produisant à des températures supérieures à  $1050^\circ\text{C}$ , en effet, la thermobarométrie indique que le magma phonolitique coexistant avec les globules carbonatitiques a été piégé à  $\sim 1050^\circ\text{C}$  et  $\sim 1.5$  kbar.

### 3.3.5 (o) The granite-pegmatite connection : insight from mica trace element chemistry

Arnaud Villaros<sup>1</sup>, Sarah Deveaud<sup>2</sup>, Michel Pichavant<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

Micas are ubiquitous minerals within granitic and pegmatitic rocks. The presence and the composition of micas are believed to depend strongly on the magma they crystallised from. We studied major and trace elements, using both electron microprobe and Laser Ablation ICP-MS, within primary micas (biotite, muscovite and lepidolite) from the different granitic phases of the St Sylvestre leucogranite complex (Western French Massif Central), and associated pegmatitic plugs intrusive in the granite. The granite can be biotite-only, biotite-muscovite or muscovite-only. Compositions of granitic micas do not vary significantly except for the muscovite-only facies that has a slightly higher F-rich content. Pegmatitic biotite is quite homogenous within single bodies but records a considerable compositional change within the entire pegmatitic field ranging from F-poor (similar to granite) towards F-rich. Pegmatitic muscovite appears rather homogeneous in major element composition with only a slightly higher Li-mica content than most granitic muscovite. Trace elements contents in muscovite are lower than in biotite but compositional trends are very similar to trends observed in biotite contents. While the variation observed within micas from the pegmatite can be related to a magmatic differentiation, facies variation within the granite may be related to changes in magma parameters such as  $f(\text{O}_2)$  and thus are probably not related to differentiation processes. From here it appears that granite and pegmatite, even though spatially associated, may follow different evolutions and may not be genetically linked despite common characters. Differences of trace element concentration between biotite and muscovite in pegmatite can either be the consequence of partition coefficient between biotite and muscovite or a diachronous crystallisation of muscovite and biotite. Additionally the reduced variability in muscovite structural formulae emphasizes a lack of sensitivity of muscovite with respect to magmatic differentiation.

### 3.3.6 (o) Imagerie LIDAR et datation U-Pb des structures tectoniques et magmatiques hercyniennes immergées de l'archipel de Molène (NO Bretagne)

Christine Authemayou<sup>1</sup>, Bernard Le Gall<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LDO, Plouzané

Des données de haute résolution LIDAR et sonar multifaisceaux (SHOM/IFREMER) acquises dans l'archipel de Molène en Bretagne Occidentale, ont fourni une image exceptionnelle de la structure du toit du socle hercynien immergé. A partir de ces données bathymétriques, d'échantillons in situ et d'une analyse structurale à terre, une carte de trajectoire des structures magmatiques et tectoniques a été réalisée. Cette étude terre/mer propose un modèle cinématique en deux phases soulignant le rôle d'une zone de relai entre deux grandes zones de cisaillement ductiles E-W, le cisaillement Nord Armoricaïn et le cisaillement des Pierres Noires. Leur activité est contemporaine dans un régime tectonique transtensif, synchrone à des intrusions magmatiques tel que le granite de Saint Renan et le complexe gabbro-dioritique de Groac'h Zu daté à 314-320 Ma (datation U-Pb zircon/monazite). Cet événement est postérieur à la formation de la schistosité régionale au cours d'un régime tectonique transpressif. Notre étude souligne le rôle clef de la tectonique décrochante synchrone d'un magmatisme intrusif au cours de l'exhumation tardi-orogénique de la partie NO de la ceinture Varisque Armoricaïne.

### 3.3.7 Keynote communication : Évolution temporelle des mécanismes de genèse de la croûte continentale juvénile

Hervé Martin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LMV, Clermont-Ferrand

L'extraction de la croûte continentale à partir du manteau a débuté il y a au moins 4,35 Ga et se poursuit encore aujourd'hui dans les zones de subduction. Toutefois, si l'environnement géodynamique est probablement resté le même, les mécanismes pétrogénétiques et les sources ont changé au cours du temps.

A l'Archéen (4,0-2,5 Ga), les gradients géothermiques plus élevés que de nos jours ont permis aux basaltes subductés d'atteindre leur température de fusion hydratée avant de s'être déshydratés. En conséquence la source de la croûte continentale archéenne (TTG = tonalite, trondh-jémite, granodiorite) avait une composition basaltique. L'étude des variations géochimiques des TTG montre que la profondeur de fusion a augmenté au cours du temps ainsi que les interactions entre les magmas TTG et les péridotites du coin de manteau.

A la limite Archéen-Protérozoïque ( $\sim 2,5$  Ga), la production de chaleur interne a diminué, résultant en des gradients géothermiques plus faibles. Les TTG disparaissent et laissent la place aux sanukitoïdes. Les taux de fusion des basaltes sont tellement faibles que les liquides felsiques produits sont totalement consommés par les interactions avec le manteau. C'est la fusion subséquente de ce manteau métasomatisé par des magmas TTG qui est la source des sanukitoïdes.

Après  $\sim 2,5$  Ga, la Terre est devenue trop froide de telle sorte que les basaltes subductés se déshydratent avant de pouvoir fondre. Ce sont les péridotites mantelliques métasomatisées, non plus par des magmas TTG, mais par des fluides qui donnent naissance à la croûte continentale moderne de composition andésitique à granodioritique.

Ces changements des mécanismes juvéniles de genèse de la croûte continentale, sont la conséquence directe du refroidissement de notre planète. A cette évolution se superpose celle des mécanismes de recyclage. En effet, au fur et à mesure de sa croissance la croûte continentale

juvénile a été soumise à des mécanismes de recyclage de plus en plus importants.

### 3.3.8 (o) Tracking magma sources via volatiles and light measurements in melt inclusions of olivines and plagioclases from Santorini lavas, (Greece)

Léa Florentin<sup>1</sup>, Etienne Deloule<sup>1</sup>, Tim Druitt<sup>2</sup>, Maxime Mercier<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

<sup>2</sup>LMV, Clermont-Ferrand

Santorini volcanic complex (Aegean Sea, Greece) started its activity 600 ky ago. Geological, petrological and chemical studies demonstrated that over the last 360 ky, twelve major explosive eruptions occurred, separated by less important, interplinian events. The penultimate major plinian event is Cape Riva's rhyodacitic eruption, dated around 21 ky BP. This study focuses on Cape Riva's and on a preceding interplinian event, the Megalo Vouno eruption, dated between 76 and 54 ky ( $\pm 25$  ky) BP. This event gathers, from oldest to newest, andesite, andesitic basalt and basalt pumice and scoriae layers.

Aiming to better constrain the sources that contributed to the magmas geneses, we measured volatiles and light elements (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, S, Cl, Li, Be, B) in the glassy melt inclusions (MI) from olivines and plagioclases.

Both measurements were done with a Secondary Ion Mass Spectrometer (SIMS) Cameca IMS 1280 at CRPG, Nancy (France). Volatiles measurements were done using Cs<sup>+</sup> primary ions, light measurements with O<sup>-</sup> primary ions. Results display an evolution in Li (from 3.7 to 15 ppm for MI in basalt, to 18.2 to 32.1 ppm for MI in rhyodacites), B (from 0.4 to 10.9 ppm for MI in basalt to 10.4 to 31.1 for MI in rhyodacites) and Be concentrations along the differentiation line of the lavas. Variations can also be observed in  $\delta^{7}\text{Li}$  (from -12.4 to 11.75 ‰) and  $\delta^{11}\text{B}$  (from -6.15 to 33.40 ‰) without correlation with magmatic differentiation. Variability of light elements inside different MIs from the same eruption, or even from the same crystal, reveals that a simple differentiation process is not enough to explain the magmas geneses. The low Li isotopic ratios seem to rule out the diffusion hypothesis. Furthermore, isotope ratios in melt inclusions from a same crystal are also variable, implying trapping of isotopically heterogeneous melts. Multiple sources and processes are thus necessary to explain these features.

### 3.3.9 (o) Influence des volatils (H<sub>2</sub>O, S) sur le devenir des sédiments subduits à haute pression

Anne-Aziliz Pelleter<sup>1</sup>, Gaëlle Prouteau<sup>1</sup>, Bruno Scaillet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

L'implication de liquides silicatés issus de la fusion des sédiments subduits dans la pétrogenèse des magmas d'arc modernes est aujourd'hui largement admise [eg. Plank & Langmuir, 1998]. Plusieurs études ont contraint les relations de phases de lithologies crustales pour des conditions de pression et température (P-T) correspondant au toit de la plaque plongeante à l'aplomb de l'arc [eg. Hermann & Spandler, 2008]. Cependant, le rôle des éléments volatils, notamment celui du soufre, dans ces systèmes est encore peu connu [Prouteau et Scaillet, 2013]. Notre étude s'appuie sur des expériences réalisées sur une pépite et une marne naturelles, non dopées en éléments en trace, en presse piston-cylindre (P : 2.5 - 3.5 GPa ; T : 750 - 1000 °C), en conditions oxydantes (~NNO +1). Pour contraindre l'effet des volatils, nous avons fait varier les teneurs en S (0 à 2 wt.%) et en H<sub>2</sub>O (5 et 8 wt.%) des sédiments. Les

produits expérimentaux ont été analysés à la microsonde électronique (majeurs, S) et par LA-ICP-MS (traces). Les premières données (3GPa, 900-1000 °C) indiquent que les verres produits dans le système pélitique ont une composition granitique et sont en équilibre avec un résidu composé de grenat et/ou orthopyroxène, silicate d'alumine, coésite, rutile  $\pm$  biotite  $\pm$  sulfures. La fusion de la marne, quant à elle, produit un liquide de composition granodioritique coexistant avec un résidu composé de grenat, coésite, silicate d'alumine, clinopyroxène, rutile  $\pm$  sulfures  $\pm$  anhydrite. L'augmentation de la teneur en S (à P, T, H<sub>2</sub>O in constants) dans le sédiment induit une augmentation du taux de fusion partielle dans les deux lithologies étudiées. Nos résultats montrent que l'agent métasomatique potentiel issu de la fusion hydratée des sédiments subduits présente les caractéristiques géochimiques typiques des magmas d'arc (eg. enrichissement relatif en LILE et appauvrissement en HFSE) et se révèle être un vecteur efficace du soufre (plusieurs centaines de ppm de S).

### 3.3.10 (o) Fluid inclusions and volatile-rich minerals in nephelinite as tracers of fluids beneath the NW African Craton (Saghro volcanic field, Anti-Atlas, Morocco)

René Chamboredon<sup>1</sup>, Fleurice Parat<sup>1</sup>, Marie-Christine Boiron<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier

<sup>2</sup>GeoResources, Nancy

Volatile-bearing minerals in intraplate alkaline lavas attest of the presence of volatile-rich components in the mantle. These may be derived from asthenospheric plumes, metasomatized subcontinental lithosphere or subducted material, and are keys to understand magma genesis and mantle dynamics. To address the question of the origin and composition of deep fluid and/or volatile-rich liquid, we investigated whole-rock and mineral geochemistry and fluid inclusions of mafic alkaline lavas from the Saghro volcanic field. These lavas are nephelinites with olivine (Fo<sub>90-82</sub>), cpx (Mg# = 87-49), nepheline and volatile-rich minerals : phlogopite, apatite (F = 1.0-2.9wt%, Cl = 0.11-0.26wt%, SO<sub>2</sub> = 0.06-0.42wt%), pyrrhotite (NF<sub>FeS</sub> = 0.90-0.95) and magnetite. The mineral assemblage and composition constrain the pre-eruptive conditions of nephelinite at oxidized redox state (logfO<sub>2</sub> = NNO-NNO+1) and 1000-1100 °C (cpx-melt equilibria). These nephelinites are mafic alkaline silica-undersaturated lavas (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O = 2.1-6.2wt%, SiO<sub>2</sub> = 37-43wt%, Mg# = 70-62). Their high Ca/Al (1.0-1.5) and Zr/Hf (44.2-55.9) ratios, high incompatible elements and negative anomalies in K, Zr, Hf and Ti suggest a carbonatite-metasomatized peridotite source.

Primary fluid inclusions occur in olivine (Fo<sub>90-85</sub>) as (i) translucent fluid inclusions ; (ii) dark isolated inclusions with daughter minerals of nepheline  $\pm$  apatite, and (iii) multi-phased inclusions with fluid and daughter minerals of nepheline  $\pm$  apatite  $\pm$  magnesite  $\pm$  phlogopite. Microthermometry and Raman spectrometry study of translucent inclusions indicates pure supercritical CO<sub>2</sub>. Assuming a temperature of 1100 °C, the trapping pressure for a CO<sub>2</sub> system is in the range 300-1050 MPa.

Our study suggests that fluid and/or volatile-rich silicate liquid (C-O-H-S-Cl-F) is involved during the genesis and evolution of alkaline magma. Fluid-rock interaction may have been an important process beneath the NW African craton, leading to metasomatized mantle with CO<sub>2</sub>-rich carbonatitic components.

### 3.3.11 (o) Origine, évolution et mise en place des complexes plutoniques alcalins en domaine océanique. Exemple des Kerguelen, Rallier du Baty

Léandre Ponthus<sup>1</sup>, Damien Guillaume<sup>1</sup>, Nicolas Ursule<sup>1</sup>, Simon Couzinié<sup>2</sup>, Lucie Mathieu<sup>3</sup>, Michel de Saint Blanquat<sup>1</sup>, Mathieu Benoit<sup>1</sup>, Michel Grégoire<sup>1</sup>, Marc Le Romancer<sup>4</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>École normale supérieure de Lyon

<sup>3</sup>Consortium de recherche en exploration minérale, Université du Québec, Canada

<sup>4</sup>LM2E, Plouzané

La diversité des roches magmatiques de Kerguelen témoigne de la surimposition d'un magmatisme de point chaud et d'un magmatisme d'expansion océanique depuis la formation du plateau il y environ 115 Ma. L'épaississement crustal océanique qui résulte de l'intense production de matière fait de ce plateau la 3<sup>ème</sup> plus grande LIP (Large Igneous Province). Une des conséquences de cet épaississement est la présence de roches plutoniques différenciées intrusives dans les niveaux structuraux supérieurs basaltiques. Majoritairement concentrées au SW de l'archipel, ces roches présentent des compositions syénitiques à granitiques formant des complexes intrusifs à compositions de croûte continentale. La présence de ces roches atteste d'une nucléation continentale en domaine océanique. Les modèles classiques de mise en place proposés dans les années 70 ne s'appliquent pas aux plutons syénitiques de Rallier du Baty. Les campagnes d'été (2009/10 et 2013/14) ont été en partie consacrées à l'étude du complexe intrusif du Sud de Rallier du Baty. Les observations à l'échelle de l'affleurement, les analyses ASM couplées à l'imagerie 3D à l'échelle de l'échantillon, et les analyses de données satellites à l'échelle de la péninsule apportent un éclairage nouveau sur la structure du complexe plutonique. Plusieurs ensembles lithologiques peuvent être distingués grâce à l'étude pétrographique des échantillons associée aux analyses géochimiques in-situ et analyses sur roches totales en éléments majeurs et traces. L'âge de cristallisation de ces différents ensembles peut être contraint à l'aide d'une approche isotopique sur roche totale et sur minéraux séparés. Toutes ces analyses en cours permettront à terme de mieux contraindre les sources, l'évolution et la mise en place du pluton alcalin du Sud de Rallier du Baty. Ces travaux fourniront enfin de nouvelles contraintes sur les modèles de croissance crustale en domaine océanique.

### 3.3.12 (o) Granitoids and extensional shear zones in the Aegean Sea (Greece), interactions during Metamorphic Core Complexes formation

Aurélien Rabillard<sup>1</sup>, Laurent Jolivet<sup>1</sup>, Laurent Arbaret<sup>1</sup>, Valentin Laurent<sup>1</sup>, Eloïse Bessière<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

Over the past thirty years, intense research has been devoted to interrelations of plutons emplacement and shear zones localization and development in various tectonic settings. Within deforming continental regions, especially regions where Metamorphic Core Complexes (MCC) developed, emplacement of plutons interacts with processes of shear localization in the crust, and shear zones nucleation and their subsequent propagation are often coeval with the crystallization of magmas in plutonic bodies. Despite existing interest, how does pluton precisely interact with extensional shear zones is still an open question. It is thus essential to recognize localizing events during cooling of magmatic bodies, measure their kinematic and temporal indicators and evaluate their ability to

localize deformation at the local- and regional-scale.

The Cyclades (Aegean Sea, Greece) form a well-suited area to study this relationship as the development of shear zones, metamorphism and emplacement of plutons are shown to be synchronous. The Cycladic granitoids (17-9Ma) intruded the middle/upper crust during thinning of the Aegean domain. They were temporally and spatially emplaced in close interaction with Miocene metamorphic domes and associated crustal-scale detachments. Integrating existing data and our new observations performed on Serifos, Mykonos, Naxos and Ikaria Islands, one can recognize a continuum of deformation from magmatic to brittle conditions within magmatic bodies, entirely kinematically consistent with shearing in host rocks. The distribution and evolution of deformation within all plutons show that the deformation tends to localize through time at the contact between granitoids and host rocks. While their large-scale structures, especially their overall asymmetries, were entirely controlled by active detachments, both the Serifos and the Naxos plutons recorded strain localization resulting in narrow shear zones nucleation during their cooling which continued to develop after their complete crystallization. On the other hand, plutons can exert a control on the activity of detachments : in several examples the intrusion makes the detachment migrate upward in the crust, progressively inactivating the deep branches of detachments (Mykonos, Tinos and Serifos).

### 3.3.13 Keynote communication : Mélange de magmas : contraintes rhéologiques et texturales à partir d'expériences HP-HT

Mickaël Laumonier<sup>1,2</sup>, Bruno Scaillet<sup>1</sup>, Laurent Arbaret<sup>1</sup>, Michel Pichavant<sup>1</sup>, Rémi Champallier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>Bavarian Research Institute of Experimental Geochemistry and Geophysics, Bayreuth, Allemagne

Les observations de terrain témoignent du mélange de magmas dans des réservoirs en profondeur. Cependant, les processus tardifs tels que l'éruption / la mise en place de magmas, la cristallisation, l'exsolution de volatils... altèrent fortement l'étude du mélange de magmas (textural & rhéologique). Pour s'affranchir de cela, trois magmas (haplotalite synthétique, basalte et dacite de Santorin) ont été juxtaposés et déformés à l'aide d'une presse de type Paterson pour contraindre les conditions de mélange de magmas à haute pression (300 MPa). Ces trois magmas ont été utilisés en conditions sèches ou hydratées et dans une gamme de température comprise entre 600 et 1200°C, permettant d'obtenir plusieurs fractions cristallines et contrastes de viscosité.

Les textures de mélange produites lors des expériences dépendent de la fraction cristalline et sont similaires aux textures rencontrées dans la nature. Les textures de mélange mécanique (mingling) produites sont la ségrégation de cristaux depuis leur magma source, la formation d'enclaves par détachement et de filaments par étirement de parcelles de magma. Le mélange chimique (mixing) est illustré par des zones d'interactions comportant une large variété de liquides intermédiaires et la cristallisation de nouvelles phases. Le mélange est produit en l'absence d'une charpente cristalline dans l'un ou l'autre des magmas, si le contraste de viscosité est faible (< 0,3 unité log). L'eau abaisse le seuil de mélange de près de 200°C entre des magmas saturés en eau par rapport à des magmas secs.

Les conditions rhéologiques favorables aux mélanges entre le magma d'un réservoir et un magma plus chaud qui le recharge ont été déterminées selon la fraction de magma injecté. Cette fraction est de 0,5 minimum pour la majorité des réservoirs typiques du contexte d'arc. La comparaison avec des systèmes plutoniques et volcaniques exposant des figures de mélange montre que les conditions favorables aux mélanges sont parfois atteintes avec des fractions inférieures, suggérant

ainsi que le fonctionnement d'un réservoir magmatique est influencé par ses styles et taux de recharge.

### 3.3.14 (o) Caractérisation pétrographique et propriétés magnétiques des dykes microgranitiques paléoprotérozoïques (1.88 Ga) du craton amazonien (Pará, Brésil) : un magmatisme anorogénique de type « SLIP »

Paul Antonio<sup>1,2</sup>, Ricardo Trindade<sup>2</sup>, Davis Carvalho De Oliveira<sup>3</sup>, Anne Nédélec<sup>1</sup>, Manoel D'agrella-Filho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de Sao Paulo, Brésil

<sup>3</sup>Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, Brésil

Un volumineux magmatisme intraplaque a affecté le craton amazonien à 1.8 Ga et définit une grande province magmatique felsique (SLIP) appelé « évènement Uatumã ». Des dykes protérozoïques mafiques et felsiques ont recoupé le socle et permettent de contraindre ce magmatisme.

Le réseau de dykes felsiques montre une direction dominante N125°. On retrouve cette orientation générale dans les dykes mafiques associés et des figures de mingling montrent un mélange entre ces deux types de magmas. Les dykes felsiques sont en moyenne larges de 15m, longs de quelques centaines de mètres et plus nombreux que les dykes mafiques. Ce sont des microgranites à phénocristaux subautomorphes de feldspath alcalin, de plagioclase, d'opaque et de quartz dans une matrice à quartz et feldspath en association graphique. Les minéraux ferromagnésiens sont le plus souvent chloritisés mais de la biotite verte a été observée. La paragenèse secondaire témoigne d'un épisode tardi-magmatique et est composée de chlorite, de calcite, de muscovite, de titanite et d'oxydes de fer. La mesure de la susceptibilité magnétique des échantillons montre que la majorité des échantillons ont des susceptibilités entre 100 et 400  $\mu$ SI avec des variations jusqu'à 1000  $\mu$ SI. La minéralogie magnétique montre que l'aimantation est portée par des grains magnétiques pseudo-mono-domaines (PSD) ainsi que par la contribution de deux composantes, une à coercivité faible (magnétite) et une de plus forte coercivité (hématite).

Ces données suggèrent que l'origine de ces dykes soit liée à un processus de « underplating » en base de croûte, lequel génèrerait plus de magma felsique que mafique. Cette idée serait en accord avec l'expression des granites de type A datés à 1.88 Ga dans la région et que l'on retrouve dans les autres cratons qui forment le supercontinent protérozoïque Columbia/Nuna.

### 3.3.15 (o) Link between crystallinity and connectivity in synthetic basalt from 3D reconstruction

Benjamin Dardé<sup>1</sup>, Louis Monnier<sup>1</sup>, Elsa Ottavi-Pupier<sup>1</sup>, Michihiko Nakamura<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais

<sup>2</sup>Department of Earth Science Tohoku University, Miyagi, Japon

Connectivity in rock samples corresponds to the percentage of crystals in contact with other crystals. For basalt samples, Philpotts et al. (1998) evidenced that, early during the cooling, when crystallinity reaches ~25%, every plagioclase crystals are connected and form a continuous three dimensional network. This study aims to reconstruct three dimensional synthetic basalt samples to confirm Philpotts et al. (1998) results by calculating connectivity as a function of crystallinity, using computer

sciences. Four synthetic samples have been obtained through Pupier et al. (2008) protocol. These four samples have the same chemical composition, and are quenched at 1170°C; 1150°C; 1130°C; and 1110°C respectively. These four quenches allow the evolution of samples morphology during cooling to be studied.

Stacks of images of these samples are then obtained through computed tomography (Uesugi et al., 2001). Images obtained through computed tomography are processed using two different software to reconstruct samples in three dimensions. Evolution of connectivity as a function of crystallinity is then calculated through two methods. Using SLICE © software, samples crystallinity and connectivity are calculated for a part of the samples. Using BLOB3D © software, crystallinity and connectivity calculations are carried out for the whole samples.

Results from both methods allow the evolution of connectivity as a function of crystallinity during the cooling of basalt samples to be observed. It is evidenced that connectivity increases sharply during the cooling. It reaches 100% for 20-25% crystallinity. Three dimensional reconstruction evidenced that plagioclase crystals tend to form a continuous network. These results are in accordance with those of Philpotts et al. (1998). Studying connectivity and plagioclase shape evolutions during cooling could allow their influence on magma rheology to be understood.

Philpotts, A.R., Shi, J., and Brustman, C., 1998. Nature, 395, 343-346.

Pupier, E., Duchêne, S., and Toplis, M.J., 2008. Contrib Mineral Petrol, 155, 555-570.

Uesugi, K., Suzuki, Y., Yagi, N., Tsuchiyama, A., and Nakano, T., 2001. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 467-468, 853-856.

### 3.3.16 (o) Cooling of a yield-stress magmatic fluid under convective chaotic mixing

Kamal El Omari<sup>1</sup>, Yves Le Guer<sup>1</sup>, Diego Perugini<sup>2</sup>

<sup>1</sup>SIAME, Pau

<sup>2</sup>Department of Physics and Geology, Perugia, Italie

In this study we use numerical experiments to investigate the cooling of a liquid basaltic magma with a yield-stress under chaotic mixing. We show, by numerically solving the momentum and energy equations, how a complex spatiotemporal distribution of the thermal field may results from the combination of buoyancy effect and chaotic advection phenomenon into a magma chamber. We consider the basaltic magma as a Bingham fluid (with a yield-stress) and for which the temperature dependence of the viscosity is modeled by an exponential law that simulate the rapid increase of the viscosity when crystals appear during cooling. The two-dimensional magma chamber considered is subjected to periodic wall movements supposed to be induced by tectonic processes. A simple shear flow corresponding to alternated moving of the two opposite side walls at a constant velocity gives rise to the chaotic dynamics of the convection. We show how the interplay between buoyancy and the existence of a yield stress affect the flow and thermal fields inside the magma chamber and lead to different cooling rates. Different statistical mixing and energy indicators are used to characterize the efficiency of cooling. The results are compared to those obtained for the chaotic mixing of a viscosity thermal dependent Newtonian magmatic fluid [1]. The large differences obtained in cooling rates (an consequently the different crystallization rates) of a single magma batch could explained the chemical heterogeneities observed in different natural igneous systems (i.e. large-scale compositionally zoning in plutons, compositional zoning in mineral phases ...).

[1] K. El Omari, Y. Le Guer and D. Perugini. Cooling of a magmatic system under chaotic mixing. Submitted to Pure and Applied Geophysics, April 2014.

### 3.3.17 (o) Solidification effects on sill formation : an experimental approach

Lola Chanceaux<sup>1</sup>, Thierry Menand<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LMV, Clermont-Ferrand

Sills represent a major mechanism for constructing continental Earth's crust because these intrusions can amalgamate and form magma reservoirs and plutons. As a result, numerous field, laboratory and numerical studies have investigated the conditions that lead to sill emplacement. However, all previous studies have neglected the potential effect magma solidification could have on sill formation. The effects of solidification on the formation of sills are studied and quantified with scaled analogue laboratory experiments. The experiments presented here involved the injection of hot vegetable oil (a magma analogue) which solidified during its propagation as a dyke in a colder and layered solid of gelatine (a host rock analogue). The gelatine solid had two layers of different stiffness, to create a priori favourable conditions to form sills. Several behaviours were observed depending on the injection temperature and the injection rate : no intrusions (extreme solidification effects), dykes stopping at the interface (high solidification effects), sills (moderate solidification effects), and dykes passing through the interface (low solidification effects). All these results can be explained quantitatively as a function of a dimensionless temperature  $\theta$ , which describes the experimental thermal conditions, and a dimensionless flux  $\Phi$ , which describes their dynamical conditions. The experiments reveal that sills can only form within a restricted domain of the  $(\theta, \Phi)$  parameter space. These experiments demonstrate that contrary to isothermal experiments where cooling could not affect sill formation, the presence of an interface that would be a priori mechanically favourable is not a sufficient condition for sill formation ; solidification effects restrict sill formation. The results are consistent with field observations and provide a means to explain why some dykes form sills when others do not under seemingly similar geological conditions.

### 3.3.18 (o) Structure interne des coulées basaltiques : étude des propriétés magnétiques des prismes des coulées de La Palisse et de Saint-Arcons-d'Allier, Massif Central

Tiphaine Boiron<sup>1</sup>, Jérôme Bascou<sup>2</sup>, Eric. E Ferré<sup>3</sup>, Bernard Guy<sup>4</sup>, Marie-Christine Gerbe<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau

<sup>2</sup>LMV, Saint-Etienne

<sup>3</sup>Southern Illinois University, États-Unis

<sup>4</sup>École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Les coulées de lave prismées sont largement décrites à la surface du globe terrestre. Cependant, les mécanismes et conditions de formation des prismes sont encore largement débattus. Alors qu'un grand nombre d'études proposent une formation lors de la contraction thermique de la coulée de lave pendant la solidification, d'autres théories sont de plus en plus évoquées, comme par exemple, la digitation par surfusion de constitution.

Afin d'apporter des contraintes sur la formation des prismes, nous avons étudié en détail les prismes de deux coulées basaltiques du Massif Central français : La Palisse (Ardèche) et Saint-Arcons-d'Allier (Allier). À l'échelle macroscopique, ces prismes montrent des structures circulaires internes, plus ou moins marquées. Notre étude vise à les caractériser à l'aide de méthodes de microscopie électronique (EBSD) et de mesures des propriétés magnétiques de la roche (Anisotropie de susceptibilité magnétique (ASM), courbes susceptibilité/température, paramètres d'hystérésis). À l'échelle du prisme, la fabrique magnétique

(ASM) reflète l'écoulement de l'ensemble de la coulée. En revanche, l'orientation des axes de susceptibilité magnétique montre une fabrique magnétique secondaire spécifique du bord du prisme, avec des directions des axes maximum de susceptibilité ( $K_{max}$ ) plus dispersés qu'au centre du prisme. De plus, les paramètres d'anisotropie décrivent une hétérogénéité de part et d'autre du prisme avec une minéralogie magnétique présentant des grains de plus petite taille au bord qu'au cJur du prisme. Ces résultats suggèrent que la formation des prismes ait pu se dérouler à plus haute température que ne le prévoit la théorie de la contraction thermique. Nous montrons par ailleurs que les coulées de lave prismées sont loin d'être homogènes que ce soit sur l'ensemble de la coulée ou à l'échelle du prisme.

### 3.3.19 (p) Plutons, volcans, et flux magmatiques

Michel De Saint Blanquat<sup>1</sup>, Thierry Menand<sup>2</sup>, Catherine Annen<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>LMV, Clermont-Ferrand

<sup>3</sup>Dpt of Earth Sciences, University of Bristol, Royaume-Uni

Les roches intrusives sont le produit dominant de l'activité magmatique de la Terre. Elles sont principalement observées sous la forme de corps de formes et de volumes variés que l'on cartographie sous le nom de plutons. Les travaux récents montrent que les plutons sont formés par des injections discontinues et localisées de magma sur des périodes de temps qui s'organisent en cycles magmatiques de durée variable. La dynamique de construction des systèmes plutoniques est donc un proxy des processus magmatiques lithosphériques profonds. La pétrologie expérimentale et les simulations numériques suggèrent que la diversité chimique des magmas intrusifs est largement acquise dans les zones sources profonde (« Deep crustal hot zone »), alors que la diversité texturale des roches plutoniques est liée à leur cristallisation à des niveaux crustaux peu profonds. De plus, de nombreux arguments structuraux, texturaux et géochronologiques montrent que les plutons ne peuvent pas être considérés comme des chambres magmatiques fossiles. Les données pétrologiques et géochimiques indiquent quant à elles que les plutons ne sont pas les restites ou les cummulats des magmas effusifs. Le lien entre les systèmes plutoniques et volcaniques doit donc être ré-évalué. Pourquoi et comment les plutons sont formés est donc primordial et central dans notre compréhension du magmatisme terrestre. Le concept de pluton repose sur l'observation que le transfert et la mise en place des magmas est localisée dans l'espace et dans le temps, c'est à dire sur l'existence d'une relation « proche dans l'espace - proche dans le temps ». La question que nous devons aborder est donc « Pourquoi et comment le magma s'accumule en un lieu donné pendant des périodes de temps variables (du millier aux millions d'années) pour former des plutons ? » Les processus de contrôle peuvent être liés à la mise en place, au transport, ou à la source, ou une combinaison de ces trois processus. Nous essayons de répondre à cette question en examinant le rôle respectif de ces trois étapes successives en utilisant une évaluation quantitative des différents flux de magma impliqués dans le transfert de magma de zones chaudes profondes vers la surface.

### 3.3.20 (p) Dolerite dikes of Kahel Tabelbala (Daoura, Ougarta range, Sud Western Algeria) : petrological, geochemical and Sr-Nd isotopic constraints

Abderrahmane Mekkaoui<sup>1</sup>, Nacera Remaci-Benaouda<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Géoressources, Environnement et Risques Naturels, Université de Béchar, Algérie

<sup>2</sup>Laboratoire Géoressources, Environnement et Risques Naturels, Département des Sciences de la Terre Université d'Oran, Algérie

The Ougarta Range corresponds to an imposing zone of reliefs arising within the saharian platform. The Kahal Tabelbala (KT), a major orogenic entity within the Daoura, is aligned along the Ougartian direction of N130° to N140°; it is distinguished by an abundance of doleritic dikes that they cut across the Neoproterozoic and Cambrian-Ordovician sedimentary stacking. Petrological, geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics reveal the presence of two groups. Group 1 dikes of Guelb Berrezouk with olivine, diopside, plagioclase and ulvospinel are characterized by potassic alkaline affinity. They display high MgO (8.70-10.2 wt%), Mg# (59-63), Cr (299.4-396 ppm) and Ni (217.1-283.8 ppm) indicative of derivation from mantle-derived melts with moderate fractionation. This group is enriched in LILE (Rb, Ba, Sr), LREE without Eu anomalies and HFSE. Group 2 dikes related to the periclinal closure event with plagioclase, augite, pigeonite and ilmenite. They are continental tholeiitic affinity with low MgO, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, similar to LPT-tholeiites. They are low REE contents, absent negative Nb anomalies. The initial isotopic ratios, corrected to 204 Ma (groupe 1) and 183 Ma (Group 2), show that group 1 dikes have relatively low ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> (0.70375 to 0.70690), positive  $\epsilon\text{Nd}$  (+2.99 to +2.60) representing a depleted isotopic component (depleted OIB pole), while the other group represents a more radiogenic in Sr (0.70443 to 0.70829) and less radiogenic in Nd (+0.19 to -0.08) isotopic composition. In the KT dolerite genesis, a heterogeneous mantle plume have probably supplying source components to the melting zone beneath Ougarta range during the Late Trias and Early Jurassic. The parental magma of group 1 was derived from partial melting of relatively fertile asthenospheric mantle source in the garnet stability field. The group 2 have probably been generated from a depleted peridotite within the spinel stability field, the isotope signature suggest an enriched mantle and show the close compositional similarity with the low-Ti tholeiitic basalts of the Central Atlantic Magmatic Province (CAMP). Geochemical and Sr-Nd analyses reflect a heterogeneous mantle source ranging from a moderately depleted mantle (+2.99 to 0.7037) to variable enrichment component (~0 to 0.7083) beneath Kahal Tabelbala, Ougarta range.

### 3.3.21 (p) Rates of magma transfer in the crust : insights into magma reservoir recharge and pluton growth

Thierry Menand<sup>1</sup>, Catherine Annen<sup>2</sup>, Michel de Saint Blanquat<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LMV, Clermont-Ferrand

<sup>2</sup>Dpt of Earth Sciences, University of Bristol, Royaume-Uni

<sup>3</sup>GET, Toulouse

Plutons have long been viewed as crystallized remnants of large magma reservoirs, a concept now challenged by high precision geochronological data coupled with thermal models. Similarly, the classical view of silicic eruptions fed by long-lived magma reservoirs that slowly differentiate between mafic recharges is being questioned by recent petrological and geophysical studies. In both cases, a key and yet unresolved issue is the rate of magma transfer in the crust. Here, we use a thermal analysis of magma transport to calculate the minimum rate of magma transfer through dykes. We find that the recharge of magma reservoirs requires a magma supply rate of at least ~0.1 km<sup>3</sup>/yr, much higher than the long-term growth rate of plutons, which demonstrates unequivocally that igneous bodies must grow incrementally. This analysis argues also for magma reservoirs being short-lived and erupting rapidly after a recharge of already differentiated magma. These findings have strong implications for the monitoring of dormant volcanic systems, and raise the question of our ability to interpret geodetic surface signals related to incipient eruptions.

### 3.3.22 (p) Source variability in a single granitic pluton : Example from the St Sylvestre Leucogranite complex

Arnaud Villaros<sup>1</sup>, Oscar Laurent<sup>2</sup>, Michel Pichavant<sup>1</sup>, Armin Zeh<sup>2</sup>, Michel Cuney<sup>3</sup>, Sarah Deveaud<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>J.W. Goethe Universität, Institut für Geowissenschaften, Frankfurt, Allemagne

<sup>3</sup>GeoRessources, Nancy

<sup>4</sup>BRGM, Orléans

The Upper carboniferous Variscan St Sylvestre Leucogranite Complex (SSLC), located in the western Massif Central (Limousin, France) is composed of four main granitic facies : a biotite-only facies (Brame), a two-mica facies (St Sylvestre); a coarse grained two-mica facies (St Goussaud); a fine grained two-mica facies (Châteauponsac) emplaced as sills within the Brame facies. We studied magmatic and inherited zircons using U/Pb datations and Lu/Hf isotopic signature. Even though some zircons present cases of lead loss and/or common lead, concordant magmatic ages provide overlapping ages for each different facies between 328±3 and 327±3 (St Sylvestre facies) and 320±3 Ma (Châteauponsac). The Brême facies confirms an existing age of 324±3 Ma and zircons from the St Goussaud facies gives a Discordia with a upper intercept at 327±13 Ma. Inherited zircons and Hf isotopes reveal differences of sources between the facies. Despite age uncertainties on single zircon, a eHf(t) vs. time diagram reveals different patterns for each granitic facies. The Model ages (TDM2) for the differentiation of crustal to the depleted mantle provide a range from 1.0 to 2.5 Ga for each phase. However, the ages of inherited zircon recorded by each phase argue in favour of different sources. The Brême and Châteauponsac facies would be related to a source with rather homogeneous U/Pb ages only ranging between 500 and 540 Ma. On the contrary, the St Sylvestre facies provide a significantly wider range of inherited ages between 480 and 660 Ma. Unfortunately the St Goussaud facies does not provide sufficiently good data to be interpreted in a similar way. These results may suggest that the St-Sylvestre leucogranitic complex is produced from the melting of a heterogeneous Cadomian crust mostly composed of orthogneiss derived from a granitic protolith of Cambrian age and Paragneisses derived from sediment deposited in a Cadomian basin collecting crustal material formed between Brioverian and Cambrian.

### 3.3.23 (p) The interplay between magma emplacement processes and chemical differentiation : a case study from the Iguilid Neoproterozoic mafic intrusion (West African Craton, Mauritania)

Hervé Diot<sup>1</sup>, Julien Berger<sup>2</sup>, Khadilou Lo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LPG, Nantes

<sup>2</sup>GET, Toulouse

<sup>3</sup>Université de Nouakchott, Mauritanie

The 2.7 Ga Iguilid mafic intrusion represent the last major magmatic pulse in the Archean domain of the Reguibat rise (northern West African Craton). It composed of gabbro-norites with minor norites and gabbros showing only few macroscopic evidences for igneous differentiation. A combined petrographic and fabric analysis (SPO and AMS) study has shown that the intrusion is structured as elliptical nested bodies alimented at the level of emplacement by separate zones of magma injection, with norites forming the western part of the intrusion and gabbro-norites

the main central and eastern part. The degree of anisotropy is very low for most samples ( $P'$  : 1-1.05) except for some norites with high magnetic susceptibility (up to 6000  $\mu$ SI).

Chemical indexes of magma differentiation based on the major-element composition of minerals (Mg#, An%) or bulk rocks are not correlated to the incompatible trace-element (Zr, Th, LREE) contents of minerals and bulk samples. This is classically interpreted as an in-situ differentiation process in progressively thickening solidification fronts, where the major element composition of minerals is controlled by the fractionation degree in equilibrium crystallisation and the trace-element content reflects the amount of trapped liquid preserved in the crystal mush. Modelling of in-situ differentiation show that samples with the highest incompatible element content are rich in trapped liquid (up to 13 wt%), while the differentiation indexes based on major elements are positively correlated to the fractionation degree. Moreover, there is a positive correlation between the fraction of interstitial melt and the degree of anisotropy of the cumulates. Igneous strain, induced by compaction, convection currents or closing of the narrow intrusion, has induced the escape of the trapped liquid fraction from the crystal mush with low incompatible elements contents whereas in other samples, deformation was limited, resulting in the preservation of significant amount of interstitial trapped liquid.

### 3.3.24 (p) The petrogenesis of plagioclase-phyric basalts from La Réunion Island

Marina Valer<sup>1</sup>, Pierre Schiano<sup>1</sup>, Patrick Bachelery<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LMV, Clermont-Ferrand

At La Réunion Island, plagioclase-bearing porphyritic basalts (PPB) were episodically emitted during eruptive phases of the Piton des Neiges and Piton de la Fournaise volcanoes and, at least for Piton des Neiges, in association with major volcanic dynamic changes. Here we provide further insights into the origin of this type of lavas, with emphasis on the magma chamber and plumbing system processes that led to the production of these rocks, based on a detailed study of the silicate melt inclusions trapped in plagioclase megacrysts in PPBs from the two volcanoes. Major and trace element compositions of plagioclase-hosted melt inclusions indicate that the crystals are inherited and their parental magmas are comparable to those of the host lava. Petrographic evidences indicate that plagioclase megacrysts could originate from fragments of a gabbroic « mush » ripped from the magma chamber walls, but our preferred explanation is that plagioclase accumulates in the melt by gravitational separation of phenocrysts at the top of the roof. Accordingly, the periodic occurrence of the PPB and their association with specific periods of the volcano growth would reflect the effects of decreasing magma supply, which promotes plagioclase crystallization and its segregation by flotation. Finally, we suggest that the PPB originally assigned to La Fournaise volcano would identify the activity decline of an older proto-volcano, the Volcan des Alizés.

### 3.4 De la rupture lithosphérique à la dorsale médio-océanique « établie » : processus mantelliques, tectoniques, magmatiques et hydrothermaux (SFMC)

- Laurent Geoffroy (Géosciences Marines, Brest)  
laurent.Geoffroy@univ-brest.fr
- Mathilde Cannat (IPG Paris)  
cannat@ipgp.fr
- Javier Escartin (IPG Paris)  
escartin@ipgp.fr

#### Résumé :

Comment naît un océan ? Cette question clé en géodynamique n'est pas simple et peut être considérée comme non résolue. La dynamique mantellique et le couplage asthénosphère-lithosphère qui sont en jeu lors de la rupture continentale sont-elles les mêmes que lors de la dynamique d'accrétion océanique ? Quels sont les marqueurs géologiques du début de l'accrétion océanique ? Existe-t-il une continuité de la géométrie et des modes de déformation entre le stade de l'extension continentale et celui de l'accrétion océanique débutante puis mature ? Pourquoi les marges passives volcaniques et les zones d'accrétion hypermagmatiques (comme l'Islande) n'ont pas la même structure que des marges non ou peu volcaniques et des dorsales pauvres en magma ? L'eau d'un océan joue-t-elle un rôle déterminant dans la rhéologie d'une lithosphère ?

### 3.4.1 (o) Structural and Magmatic Evolution of Atlantic Type Rifted Margins

Gianreto Manatschal<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Strasbourg

The increasing number of high quality reflection and refraction seismic surveys and drill hole data in Atlantic type rifted margins show a divergent style of margin architecture and evolution in which quantity and distribution of syn-rift magmatism and fault structures are the most variable features. These observations led to an oversimplified classification of rifted margins as either volcanic or non-volcanic. Although this simple concept may lead to the idea that margins evolve either under the presence or absence of magma, the available data show that rifted margins are more complex and cannot be characterized based on the volume of observed magma alone. Indeed so-called « non-volcanic » margins are not necessarily amagmatic, as shown by the results of ODP drilling along the Iberia-Newfoundland rifted margins. On the other hand, magma-rich margins, such as the Norwegian rifted margins, show evidence for hyper-extended crust, suggesting that there is more deformation before magma emplacement as previously proposed. This leads to the question about how magmatic and tectonic processes are interacting before, during and after continental breakup.

In my presentation I will review results from the South and North Atlantic and will discuss the structural and magmatic evolution of so called magma-rich and magma-poor rifted margins. I will show that the commonly proposed end-member type margins, i.e. « non-magmatic » and « non-tectonic » margins do not exist and that rifted margins show a more complex poly-phase tectonic and magmatic evolution as previously suggested. However, it remains unclear whether decompression melting is the driving force, or rather the consequence of extension. In my presentation I will discuss to what extent variable amounts of magma may control the evolution and timing of continental breakup and control the architecture of Atlantic type rifted margins.

### 3.4.2 (o) Les variations latérales de style d'extension crustale; l'examen d'une marge par une collaboration Industrie-Recherche académique

Manuel Pubellier<sup>1</sup>, Dimitri Savva<sup>1</sup>, Jean-Luc Auxière<sup>2</sup>, Nicolas Chamot-Rooke<sup>1</sup>, Florian Meresse<sup>2</sup>, Benoit Mouly<sup>2</sup>, Dieter Franke<sup>4</sup>, Stephan Steuer<sup>4</sup>, Kenny Po Wong<sup>5</sup>, Thibaud Pichot<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LGE, Paris

<sup>2</sup>TOTAL, Paris-La Défense

<sup>3</sup>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Allemagne

<sup>4</sup>The University of Hong Kong, R.A.S. chinoise de Hong Kong

La Mer de Chine a été étudiée par une collaboration sur 4 ans entre Total l'ENS, le CNRS et le BGR, conjointement avec l'U. des Philippines, de Hong Kong et le Service Géologique Marin de Canton (GMGS). Le but était d'explorer avec une grande quantité de données sismiques industrielles disponibles les différents stades et processus de rifting sur un système jeune avec une évolution diachrone, des marges conjuguées proches héritées d'une zone de convergence plus ancienne. L'extension s'effectue sur une chaîne mésozoïque de type andin aujourd'hui disparue, mais dont subsistent de larges plutons déca-kilométriques. La zone très étirée s'étend sur 400 kilomètres avec une morphologie rappelant celle du « Basin and Range » des US. Ce bassin s'ouvre de façon apparemment synchrone de la fermeture par subduction d'un bassin crétacé à Eocène autrefois juxtaposé; la Proto-Mer de Chine.

L'étude effectuée à partir de terrain, de lignes sismiques académiques et

industrielle calées à des puits, de Traces de Fission, permet d'apporter des précisions sur l'héritage et le transit des sédiments et de pondérer certains dogmes de l'extension continentale.

1 - L'extension s'opère pendant une période très longue de la fin du Crétacé au Miocène Supérieur, le rifting sensu stricto n'étant qu'un des épisodes. Cela implique une évolution spatio-temporelle de la localisation du pic d'extension.

2 - Les marges sont maintenues sans subsidence régionale pendant et après le rifting, ce qui peut informer sur les relations croûte/manteau.

3 - L'extension continue bien après la cessation du rifting jusqu'à la fin de l'expansion océanique

4 - L'extension pendant les phases d'étirement et d'amincissement se fait par réactivation des morpho-structures héritées et peut amener à l'exhumation du Manteau supérieur. La TOC est très bien marquée.

5 - Les conditions aux limites (subduction voisine) semblent contrôler étroitement l'évolution de l'extension.

### 3.4.3 (o) Djibouti/Asal revisité : mécanismes de break-up et de primo-océanisation assistés par une tectonique en détachements

Laurent Geoffroy<sup>1</sup>, Bernard Le Gall<sup>1</sup>, Mohamed Daoud<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IUEM, Plouzané

<sup>2</sup>Centre d'études et de recherches scientifiques de Djibouti, Djibouti

Nous présentons une vision radicalement différente de la tectonique du SE de l'Afar à Djibouti. A partir de l'étude couplée de l'ensemble des données disponibles (y compris données de terrain et imagerie satellitaire), nous démontrons l'existence de deux marges passives très asymétriques au niveau desquelles la déformation est accommodée par une tectonique en détachements ayant conduit au break-up continental.

Dans une première étape, de ~ 8-9 Ma à ~ 2.2 Ma, la déformation est typique d'une marge passive volcanique avec une extension synmagmatique accommodée par de grands détachements à plongement vers le SW ou vers l'W. Ces détachements sont associés à la croissance de prismes magmatiques épais individualisés dans les formations Dahla et Stratoïdes. Au sud de l'axe de break-up Ghoubbett-Asal-Manda Inaro (GAMI), les prismes plongent (et sont ouverts) vers le NE, c'est à dire de manière opposée à la structuration post-stratoïde récente décrite jusqu'à présent. Cette tectonique est associée à une accretion magmatique et à une extension très importantes, mais non quantifiables actuellement. Cette tectonique syn-magmatique s'achève il y a 2 Ma par une période d'érosion et de pénéplation et la mise en place des séries stratoïdes terminales, peu épaisses. Un basculement spectaculaire de la déformation intervient alors avec développement d'une tectonique en détachements syn-sédimentaires de vergence opposée à la tectonique syn-magmatique expliquant la morphologie actuelle du système. Cette déformation en extension est peu importante (< 0.15) mais conduit à la rupture lithosphérique et à une primo-océanisation le long de l'axe GAMI. Un détachement secondaire est actif à l'apex du segment d'accrétion sub-océanique d'Asal (faille de Doubié), faille qui contrôle le développement actif d'une flexure crustale, la flexure de Makarassou. Nous discutons la signification de cette tectonique étonnante au regard de découvertes récentes sur la structure des domaines hyper-étirés des marges passives et sur le fonctionnement des dorsales lentes.

### 3.4.4 (o) Surface deformation in Central Afar using geodetic data

Aline Deprez<sup>1</sup>, Cécile Doubré<sup>2</sup>, Raphael Grandin<sup>3</sup>, Ibrahim Ahmed Saad<sup>4</sup>, Frédéric Masson<sup>1</sup>, Anne Socquet<sup>5</sup>

<sup>1</sup>EOST, Strasbourg

<sup>2</sup>IPG Strasbourg

<sup>3</sup>IPG Paris

<sup>4</sup>Observatoire Géophysique d'Arta, Djibouti

<sup>5</sup>ISTerre, Grenoble

The Afar Depression connects all three continental plates of Arabia, Somalia and Nubia. For over 20 Ma, the divergent motion of these plates has led to the formation of normal faults building tall scarps between the high plateaus and the depression, and the development of large basins and an incipient seafloor spreading along a series of active volcano-tectonic rift segments within the depression. The space-time evolution of the active surface deformation over the whole Afar region remains uncertain. Previous tectonic and geodetic studies confirm that a large part of the current deformation is concentrated along these segments. However, the amount of extension accommodated by other non-volcanic basins and normal faulting remains unclear, despite significant micro-seismic activity. Due to the active volcanism, large transient displacements related to dyking sequence, increase the difficulty to characterize the deformation field over simple time and space scales.

In this study, we attempt to obtain a complete inventory of the deformation within the whole Afar Depression and to understand the associated phenomena, which occurred in this singular tectonic environment.

We study in particular, the behavior of the structures activated during the post-dyking stage of the rift segments. To do so, we conduct a careful processing of a large set of SAR ENVISAT images over the 2004-2010 period, we also use previous InSAR results and GPS data from permanent stations and from campaigns conducted from 1999 to 2014 within a GPS network particularly dense along the AG rift.

In the western part of Afar, the far-field response of the 2005-2010 dyke sequence appears to be the dominant surface motion on the mean velocity field. More eastward across the AG rift, strong gradients of deformation are observed.

The time series analysis of both InSAR and GPS data allow us to point out the role of volcano activity on the localization of the extensive deformation within these rifts, describe the temporal evolution of the mostly aseismic fault slips, and characterize the behavior of the crust after the dyking events in relation to visco-elastic relaxation.

Moreover, we analyze several interesting small patches of localized deformation revealing transient displacements by combining time series results and seismic data collected by the OGA in Djibouti.

### 3.4.5 (o) Dissecting oceanic detachment faults : Links between extensional tectonics and nature of fluid-rock interactions on the oceanic lithosphere

Diane Bonnemains<sup>1</sup>, Javier Escartin<sup>1</sup>, Muriel Andreani<sup>2</sup>, Odegar Science Team<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>LGLTPE, Lyon

<sup>3</sup>ODEMAR, IPG Paris

Slow-spreading ridges localize extension along long-lived oceanic detachment faults that root deeply below the ridge axis. We will present results of geological investigations at the 13°20'N and 13°30'N detachments along the MAR, conducted during the ODEMAR cruise (Nov-Dec 2013, RV Pourquoi Pas ?) with ROV Victor 6000 (IFREMER). These detachments are flexurally domed during exhumation, and display striations parallel to spreading where we identified fault outcrops. They constitute a complex zone of anastomosing deformation planes, with a highly heterogeneous distribution of deformation.

We have conducted a preliminary analysis of field observations and 212 samples obtained from the 13°20'N detachment at different structural areas. The toe, corresponding to a wedge of footwall material uplifted

by the detachment, yielded primarily basalt (green-schist facies for half of the samples), with a locally occurrence of serpentinites and gabbros. Between the toe and the corrugated surface, green-schist basalt represents one third of all samples, and the remaining two-thirds correspond to basalt, peridotites and gabbros are found in similar proportions. On the corrugated surface we have identified and explored 7 fault outcrops on the flanks of microbathymetric striations, which systematically show subhorizontal striations on the fault surface exposed, subparallel to the direction of extension. The most prominent outcrops have lengths of 40-90 m and heights of up to 5 m. The 19 in situ samples taken from these striated surfaces are green-schists basalt breccias, with one occurrence of schistose serpentinite. Unconsolidated rubble (basalt and serpentinite primarily) systematically caps these outcrops.

Based on these results, and observations from the Northern detachment, we will present a model of detachment fault formation and evolution, which involves the plating of footwall material into the fault zone, a process that likely occurs in the green-schist facies.

### 3.4.6 (o) Les dorsales ultra-lentes, une réponse au jeu de la tectonique des plaques et de la convection mantellique

Laurent Husson<sup>1</sup>, Philippe Yamato<sup>2</sup>, Antoine Bezos<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>Géosciences Rennes

<sup>3</sup>LPG, Nantes

Ultra-slow spreading ridges such as the South West Indian ridge or the Arctic ridge system are oddities amongst oceanic ridges. Indeed, conversely to faster oceanic ridges, petrographic and seafloor studies have shown that they are characterized by low melt supply and present low crustal thicknesses and heat flow; these features are interpreted as an evidence for a cooler sublithospheric mantle. In cartoonish sketches of plate tectonics, ridges open above upwellings, subduction zones occur over downwellings, and plates are riding over the mantle convection cells. In this study, we designed a simple yet dynamically consistent thermal convection model to test the impact of far-field forces on spreading ridges and show that this pattern is disrupted by plate tectonics. In particular, continental collisions modulate the spreading rates because resisting forces build up at plate boundaries. As a consequence, this modifies the surface boundary conditions and therefore the underlying mantle flow. We show that the ideal convection cell pattern quickly breaks down when plate motion is impeded by continental collisions in the far field. Not only the decreasing spreading rates are diagnostic, but in the same time, (i) the heat flow is decreasing at the ridge, (ii) the thermal structure of the cooling lithosphere no longer matches the cooling half-space model, and (iii) the mantle temperature beneath the ridge drops by more than 100 degrees. We compare our model predictions to available observables and show that this simple mechanism explains the atypical thermo-mechanical evolution of the South West Indian ridge and Arctic ridge system. Last, the recent S wave seismic tomography model of Debayle and Ricard (2012) reveals that only away from those two ridges does lithospheric thickening depart from the half-space cooling model, in accord with our model predictions.

### 3.4.7 (p) Cycles magmatiques et organisation de la plomberie magmatique dans un rift en cours d'océanisation ; l'exemple du segment Dabbahu / Manda-Hararo (Afar, Ethiopie)

Lydéric France<sup>1</sup>, Julien Humbert<sup>1</sup>, Sarah Medynski<sup>1</sup>, Raphaël Pik<sup>1</sup>,  
 Pete Burnard<sup>1</sup>, Andreas Pack<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

<sup>2</sup>Geowissenschaftliches Zentrum, Göttingen, Allemagne

La dépression Afar (Ethiopie) correspond à un point triple où convergent trois zones d'extension (mer Rouge, golfe d'Aden et rift Est-Africain). Le magmatisme en Afar est organisé de manière similaire à une dorsale océanique avec différents segments (~100 km de long) qui concentrent l'activité magmatique. Le segment Dabbahu / Manda-Hararo (DMH) a connu une activité récente (dikes et coulées de 2005 à 2010), et est particulièrement bien documenté géophysiquement. L'objectif de cette étude est de caractériser l'organisation et l'évolution du système magmatique présent au centre du segment DMH pour le comparer aux dorsales actuelles et ainsi contraindre son degré d'océanisation ; l'enjeu étant de comprendre comment s'initie un centre d'accrétion océanique.

Nos résultats (terrain, imagerie spatiale, géochimie et datation de laves) mettent en évidence que les magmas émis à l'axe du segment sont transférés via différentes chambres magmatiques individualisées (alimentées par différents magmas) et relativement éphémères (durée de vie de l'ordre de 20-30 ka). Certaines de ces chambres sont matérialisées en surface par des calderas qui enregistrent leur vidange terminale. L'étude d'enclaves cumulatives récoltées à l'axe du segment sur le bord d'une caldera permet de regarder directement à l'intérieur de l'une de ces chambres et de quantifier les processus qui s'y produisent (alimentation / recharge, convection, séquence de cristallisation, contamination crustale...), ainsi que les conditions pré-éruptives et par conséquent de mieux comprendre l'information portée par les laves. Les données indiquent que le magma alimentant ces chambres peu profondes (~2-3 km) est partiellement différencié, attestant de la présence de chambre(s) plus profonde(s).

La connaissance de l'organisation de la plomberie magmatique à l'axe du segment permet de plus d'avoir une meilleure connaissance de la structure de la croûte dans cette région et donc de d'affiner les modèles sismiques disponibles.

### 3.4.8 (p) Enregistrement par les dépôts riches en oxydes des processus hydrothermaux et d'altération liés à exhumation des serpentinites de la ride ultra-lente SW Indienne (mission MD183-Smoothseafloor)

Anne Marie Karpoff<sup>1</sup>, Daniel Sauter<sup>1</sup>, Mathilde Cannat<sup>2</sup>, Gianreto  
 Manatschal<sup>1</sup>, Pierre Agrinier<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IPG Strasbourg

<sup>2</sup>IPG Paris

La ride SW Indienne (SWIR) ultra-lente est caractérisée par des portions étendues profondes, peu ou non-volcaniques, nommées "smooth seafloor" par leur topographie lissée, sans équivalent sur les dorsales rapides. L'exploration de telles zones proches de l'axe a été menée durant la mission MD183 « Smoothseafloor » (NO Marion Dufresne ; 2010) pour préciser la structure et l'âge de ces domaines corrugués, la nature

de leurs faciès pétrologiques, et rechercher les traces d'hydrothermalisme. 35 dragages ont été réalisés. Dans les zones de « smooth seafloor », des péridotites très serpentinisées sont systématiquement récoltées tandis que gabbros et basaltes y sont rares. Ainsi, depuis les derniers 10Ma l'exhumation de manteau est le mécanisme majeur de la structuration du plancher. Afin d'établir la contribution du manteau exhumé sur les transferts chimiques aux sédiments et océan, l'étude est menée sur les phases d'altération tardive des serpentinites et les sédiments. Des croûtes massives d'oxydes-Fe, riches en Si, recouvrent les serpentinites très altérées et bréchifiées, et forment d'abondants « nodules » dans les sites les plus éloignés de l'axe. Ces oxydes Fe-Si, pauvres en Mn, ont des caractères géochimiques de formation hydrothermale (BT). Dans les sites proches de la zone axiale, l'altération des brèches de serpentinites forme de l'aragonite ou de la calcite massive (matrice indurée), des oxydes-Fe en matrice de texture argileuse, puis des encroûtements d'oxydes Fe-Si-Mn. Dans les lamines de ces derniers des néoformations tardives de serpentine et de dolomite sont observées. Les sédiments pélagiques carbonatés reposant sur le plancher sont enrichis en oxydes-Fe, argiles et fins clastes de serpentine, et en quelques sites sont indurés par recristallisation secondaire. La succession minéralogique et la composition de ces faciès atteste de remobilisations locales importantes et des réactions eau-roche en conditions hydrothermales de BT. Ces indices d'altération et de circulations de fluides sont reliés aux derniers stades de la dynamique d'exhumation des péridotites serpentinisées, en zone axiale de la SWIR.

### 3.4.9 (p) Lien entre carbonatation et serpentinisation associé au fonctionnement d'un système hydrothermal océanique : exemple des ophicalcites du Chenaillet (Alpes occidentales)

Romain Lafay<sup>1</sup>, Stéphane Schwartz<sup>1</sup>, German Montes-Hernandez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

Depuis la première observation de serpentinites le long de la ride Médio-Atlantique à 45°N, les serpentinites ont été largement identifiées comme étant un des constituants lithologiques majeurs de la croûte océanique associé au développement des rides d'accrétion océaniques lentes à ultra-lentes (<40mm/an) et peuvent représenter jusqu'à 25% du plancher océanique (Cannat et al., 2010). Les serpentinites océaniques observées dans les Alpes occidentales présentent des textures de type mesh à lizardite + magnétite témoignant de la déstabilisation de l'olivine primaire (Schwartz et al., 2013). Dans le massif du Chenaillet les serpentinites océaniques sont parfaitement préservées. Localement, elles sont associées au fonctionnement de paléo-failles océaniques ou elles forment des brèches cimentées par des carbonates à calcite et dolomite d'origine métasomatique (Lemoine et al., 1983) désignées sous le terme d'ophicalcites avec dans le détail la présence de deux générations de carbonate qui interagissent avec les serpentinites. Nous proposons d'étudier la formation des différentes générations de carbonate associées aux serpentinites à partir d'une étude pétrologique fine couplant microscopie optique, SEM, DRX, Microsonde électronique, micro-fluorescence X et spectroscopie Raman. Les résultats mettent en évidence la coprécipitation de calcite et de chrysotile tardive dans le processus de bréchification et permettent de proposer un modèle cohérent de formation des ophicalcites lors de la genèse de la croûte océanique en contexte de ride lente à ultra lente.

Cannat M., Fontaine F., Escartín J., 2010. Serpentinization at slow-spreading ridges : Extent and associated hydrogen and methane fluxes. In : Rona P et al (eds) Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridge. American Geophysical Union Geophysical Monograph 188, 241-264.

Lemoine M., Bourbon, M., Graciansky P.C., Létolle R., 1983. Isotopes du carbone et de l'oxygène de calcaires associés à des ophiolites (Alpes Occidentales, Corse, Apennin) : indices possibles d'un hydrothermalisme océanique téthysien. *Revue de géologie Dynamique et de Géographie Physique* 24, 305-384.

Schwartz S., Guillot S., Reynard B., Lafay R., Debret B., Nicolle C., Lanari P., Auzende A.L., 2013. Pressure-temperature estimates of the lizardite/antigorite transition in high pressure serpentinites. *Lithos* 178, 197-210.

### 3.4.10 (p) Sources mantelliques et break up continental : exemple de la province magmatique nord Atlantique

Priscilla Mouillard<sup>1</sup>, Arnaud Agranié<sup>1</sup>, René Maury<sup>1</sup>, Philippe Nonnotte<sup>1</sup>, Laurent Geoffroy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IUEM, Plouzané

L'extension continentale entre les plaques nord-américaine et groenlandaise a débuté il y a ~130 Ma. Elle a abouti à l'ouverture de la Baie de Baffin et de la Mer du Labrador au Paléocène et à l'Eocène. A la même époque, du côté est-groenlandais, s'ouvre l'océan nord-atlantique. Dans toutes ces régions, le break up continental et le début de l'océanisation sont associés à la formation de marges volcaniques et sont précédés par la mise en place de plateaux basaltiques (traps) d'âge Paléocène. Une anomalie thermique (dite thuléenne), actuellement centrée sous l'Islande, serait à l'origine de l'ensemble de ce volcanisme nord-atlantique.

Au cours de cette étude, nous avons échantillonné les basaltes de l'ouest du Groenland. Nous avons mesuré les concentrations en éléments majeurs et traces de >150 échantillons et les compositions isotopiques de Hf, Pb, Sr et Nd de >100 échantillons. Ces basaltes datés par Ar-Ar et K-Ar retracent la fusion mantellique en relation avec l'anomalie thermique lors de l'ouverture Baffin-Labrador. Les résultats obtenus sont confrontés à ceux des autres régions nord-atlantiques, notamment à ceux de l'est du Groenland dont le substratum précambrien est identique à celui des régions ouest-groenland. La comparaison des données géochimiques permet d'identifier les similarités et les différences entre les sources qui ont participé à la fusion et les contaminants lors du break up lithosphérique. Elle permet également d'observer comment évoluent ces sources lorsqu'on passe de l'extension continentale précoce à l'océanisation.

### 3.4.11 (p) Géométries des prismes basaltiques de « SDRs » (Seaward Dipping Reflectors) aux confins des croûtes continentales et océaniques à partir de données de sismique réflexion.

Philippe Werner<sup>1</sup>, Laurent Geoffroy<sup>2</sup>, Huixin Guan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Total, Paris-La Défense

<sup>2</sup>IUEM, Plouzané

Les marges passives volcaniques se caractérisent par une grande épaisseur (5 à >10 km) de coulées basaltiques à pendage vers l'océan nommées « SDRs » (Seaward Dipping Reflectors) et par un sous-placage important d'intrusions mafiques (5-10 km), qui serait lié à cet excès de volcanisme.

Une étude d'interprétation des prismes de SDRs à partir de données 2D de sismique réflexion a été réalisée le long de profils régionaux sur les marges conjuguées de l'Atlantique Sud et sur la marge Ouest Indienne. Certains de ces profils acquis avec une longue écoute de 15 s

(tw) permettent de mieux comprendre les relations géométriques de ces prismes avec les parties les plus profondes de la croûte continentale sur lesquelles ils se sont mis en place lors d'une phase extensive de syn-rift magmatique précédant la rupture de la croûte continentale.

Il apparaît ainsi que les bordures océaniques des prismes correspondent souvent à une interruption brutale des réflexions sismiques dont l'enveloppe est interprétée comme des zones de failles normales pentées vers le continent et s'amortissant soit dans la croûte inférieure par le biais de réactivation d'anciens cisaillements, soit au toit d'un ensemble de réflexions parallèles et de forte amplitude, proche du Moho ou des corps mafiques sous-plaquéés.

Ces géométries ainsi qu'une description de faciès sismiques (coulées subaériennes, sills et dykes) au sein des SDRs sont clairement illustrées par des profils choisis dans les marges brésilienne, uruguayenne, namibienne et Ouest indienne.

### **3.5 Dynamique des marges passives : du rifting au post-rift (associée Actions Marges)**

#### **(Evolution of passive margins : from rifting to post-rift)**

- Delphine Rouby (GET, Toulouse)  
delphine.rouby@get.obs-mip.fr
- Cécile Robin (Géosciences Rennes)  
cecile.robin@univ-rennes1.fr
- Sylvie Leroy (ISTeP, Paris)  
sylvie.leroy@upmc.fr
- Lies Loncke (Université Perpignan)  
lies.loncke@univ-perp.fr
- Julia Autin (IPGS, Strasbourg)  
autin@unistra.fr

#### **Résumé :**

Cette session a pour objectif d'illustrer et discuter l'ensemble des processus d'étirement de la lithosphère depuis la formation des rifts continentaux, la rupture continentale et l'évolution post rift de la lithosphère étirée et ceci, en incluant l'impact du magmatisme, des processus de surface et de la dynamique mantellique. Les contributions originales s'appuyant sur des données géologiques s.l. et géophysique s.l. et/ou sur une approche de modélisation sont les bienvenues.

### 3.5.1 *Keynote communication* : Continental Thinning and Passive Margin genesis : Towards a general model? Insights of the Gulf of Lion-Sardinia System

Daniel Aslanian<sup>1,2</sup>, Maryline Moulin<sup>1</sup>, Marina Rabineau<sup>3</sup>, Alexandra Afilhado<sup>1,4</sup>, François Bache<sup>5</sup>, Estelle Leroux<sup>1,6</sup>, Frauke Klingelhoefer<sup>1,2</sup>, Philippe Schnurle<sup>1</sup>, Luís Matias<sup>7</sup>, Christian Gorini<sup>6</sup>, Cinthia Labails<sup>8</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Géodynamique et de Géophysique, Plouzané

<sup>2</sup>IFREMER, Plouzané

<sup>3</sup>LDO, Plouzané

<sup>4</sup>Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal

<sup>5</sup>SANTOS Ltd, Adelaide, Australie

<sup>6</sup>ISTeP, Paris

<sup>7</sup>Instituto Dom Luiz, Lisboa, Portugal

<sup>8</sup>Vermilion Energy, Parentis en Born

Due to its landlock situation, its youth, its thick sedimentary layers and the MSC event, and the huge amount of available data and multidisciplinary studies, the conjugate margins system of the Gulf of Lions and west Sardinia system (GLSS) represents a unique natural laboratory to address fundamental questions about rifting (i.e. crustal thinning, the nature of the continent-ocean transition zone and the style of rifting and subsequent evolution and the connexion between deep and surface processes). The GLSS represents one of the rare case of entire contiguous system located in a small area, where deep structure and the thick (up to 6.2 km) sedimentary cover are well documented, and it could be effectively used to validate models of continental break-up and subsidence. Although rifting in back-arc basins might differ somewhat from cratonic rifting, the mechanics of thinning of the continental crust ought to be similar. The comparison of the wide-angle & reflexion seismic results from experiment Sardinia (Moulin et al., this session) with the Atlantic passive margins and the intra-continental basins allows to propose general rules for the continental thinning process and the passive margin genesis.

### 3.5.2 (o) Seismic imaging of the eastern Algerian margin off Jijel from wide-angle and seismic reflection data

Philippe Schnurle<sup>1</sup>, Abdelhafid Mihoubi<sup>2</sup>, Zahia Benaissa<sup>3</sup>, Madjid Badsì<sup>2</sup>, Rabbah Bracène<sup>2</sup>, Hamou Djelil<sup>4</sup>, Louis Géli<sup>1</sup>, Françoise Sage<sup>1</sup>, Abdelghani Agoudjil<sup>2</sup>, Frauke Klingelhoefer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IFREMER, Plouzané

<sup>2</sup>Sonatrach Exploration, Boumerdès, Algérie

<sup>3</sup>Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie

<sup>4</sup>CRAAG, Alger, Algérie

<sup>5</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

This study presents the results of a deep seismic survey across the north Algerian margin, based on the combination of 2D multi-channel and wide-angle seismic data simultaneously recorded by 41 ocean bottom seismometers deployed along a North-South line extending 180 km off Jijel into the Algerian offshore basin, and 25 land stations deployed along a 100 km-long line, cutting through the Lesser Kabylia and the Tellian thrust-belt. The final model obtained using forward modelling of the wide-angle data and pre-stack depth migration of the seismic reflection data provides an unprecedented view of the sedimentary and crustal structure of the margin. The sedimentary layers in the Algerian basin are 3.75 km thick to the north and up to 4.5 to 5 km thick at the foot of the margin. They are characterised by seismic velocities from

1.9 km/s to 3.8 km/s. Messinian salt formations are about 1 km thick the study area, and are modelled and imaged using a velocity between 3.7 km/s to 3.8 km/s. The crust in the deep sea basin is about 4.5 km thick and of oceanic origin, presenting two distinct layers with a high gradient upper crust (4.7 km/s - 6.1 km) and a low gradient lower crust (6.2 km/s - 7.1 km/s). The upper mantle velocity is constrained to 7.9 km/s. The ocean-continent transition zone is very narrow between 15 km to 20 km wide. The continental crust reaches 25 km depth as imaged from the most landward station and thins to 5 km over a less than 70 km distance. The continental crust presents steep and asymmetric upper and lower crust geometry, possibly due to either asymmetric rifting of the margin, an underplated body, or flow of lower crustal material towards the ocean basin. Present-time deformation, as imaged from 3 additional seismic profiles, is characterized by an interplay of gravity-driven mobile-salt creep and active thrusting at the foot of the tectonically inverted Algerian margin.

### 3.5.3 (o) Enregistrement de l'activité post-rift pliocène sur la marge occidentale de la Mer Tyrrhénienne

Frank Chanier<sup>1</sup>, Virginie Gaullier<sup>1</sup>, Agnès Maillard<sup>2</sup>, Isabelle Thion<sup>3</sup>, Johanna Lofi<sup>4</sup>, Françoise Sage<sup>5</sup>, Pierre Giresse<sup>6</sup>, Maria-Angela Bassetti<sup>6</sup>, Gaël Lymer<sup>1</sup>, Fabien Graveleau<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosystèmes, Lille

<sup>2</sup>GET, Toulouse

<sup>3</sup>BRGM, Orléans

<sup>4</sup>Géosciences Montpellier

<sup>5</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>6</sup>CEFREM, Perpignan

Le projet METYSS-METYSAR est un chantier terre-mer bénéficiant du soutien programmatique « Actions Marges » qui a notamment pour objectif de contraindre les relations entre tectonique, sédimentation, et évolution géodynamique de la Marge Est-Sarde (Gaullier et al., 2014). L'ouverture arrière-arc de la Mer Tyrrhénienne, entre la Sardaigne et le domaine Apennins-Calabre-Sicile, résulte du retrait progressif de la subduction calabraise vers le Sud-Est. Nos travaux ont permis de préciser la chronologie du rifting de la Marge Est-Sarde, qui s'avère compris entre le Serravallien-Tortonien et la base du Messinien (c. 12 à 6 Ma) (Gaullier et al., ce congrès). Par ailleurs, l'âge des basaltes du domaine profond suggère un début d'océanisation au plus tard vers 4,3 Ma dans le Bassin de Vavilov mais elle pourrait intervenir plus tôt dans le Bassin de Magnaghi (à partir de 5 Ma, voire 7 Ma selon les auteurs). Nos données sismiques en mer ainsi que les données de terrain sur la bordure orientale de la Sardaigne témoignent d'un épisode tectonique significatif au cours du Pliocène. Cet épisode se traduit par une discontinuité sismique intra-Pliocène qui est localement recouverte par des séries en éventail. De tels éventails sont aussi observés à terre au sein de séries néogènes qui scellent la surface d'érosion messinienne et qui ont livré des microfaunes attribuées à un Pliocène qui est postérieur à 4,52 Ma (cf FO de *Globorotalia puncticulata*). Ces géométries témoignent ainsi de basculements tectoniques syn-sédimentaires et suggèrent le développement de structures compressives de grande longueur d'onde. L'ensemble de nos résultats illustre l'existence d'un épisode tectonique compressif, clairement post-rift, qui se développe peu après les premiers stades de l'océanisation. Cette tectonique peut être liée aux mécanismes d'ouverture propres à la Mer Tyrrhénienne mais peut aussi refléter un épisode d'inversion tectonique sur un plus large domaine de la Méditerranée Occidentale.

### 3.5.4 (o) Interactions déformation-sédimentation le long de la marge est-sarde (mer tyrrhénienne) : du rifting à la reactivation

Virginie Gaullier<sup>1</sup>, Frank Chanier<sup>1</sup>, Bruno Vendeville<sup>1</sup>, Johanna Lofi<sup>2</sup>, Gaël Lymer<sup>1</sup>, Agnès Maillard<sup>3</sup>, Françoise Sage<sup>4</sup>, Isabelle Thion<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Géosystèmes, Lille

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier

<sup>3</sup>GET, Toulouse

<sup>4</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>5</sup>BRGM, Orléans

Le projet Terre-Mer « METYSS-METYSAR », développé dans le cadre du programme « Actions Marges », est focalisé sur les relations entre tectonique crustale, tectonique salifère et sédimentation sur la marge occidentale de la Mer Tyrrhénienne. Nos résultats reposent sur des données sismiques acquises lors de deux campagnes sur le N/O « Téthys II », « METYSS 1 et 3 », le long de la Sardaigne orientale depuis le Bassin Est-Sarde jusqu'à la Terrasse de Cornaglia afin d'en caractériser l'architecture sédimentaire et la trame structurale au cours du Néogène et plus particulièrement pendant la période-clé de la Crise de Salinité Messinienne (Gaullier et al., 2014). En parallèle, nous avons mené des études sur le terrain (« METYSAR ») dans la région d'Orosei, seul secteur qui permet d'observer des séries pliocènes au dessus de la surface d'érosion messinienne. Ce domaine tyrrhénien, en contexte arrière-arc, est caractérisé par un rifting néogène et une océanisation avérée au moins à partir du Pliocène inférieur, dans un secteur fortement marqué par des héritages structuraux (orogénèses alpine, pyrénéenne, hercynienne). Nous montrons que le rifting est anté-Messinien, rapide et synchrone sur l'ensemble du secteur d'étude, depuis la zone littorale jusqu'à la Terrasse de Cornaglia. Nous démontrons en particulier que des éventails sédimentaires syn-Messinien sont associés à de la tectonique salifère, et ne correspondent donc pas à des éventails syn-rift comme cela avait été interprété auparavant. Par ailleurs, les marqueurs sismiques du Messinien et du Pliocène montrent des signes d'une réactivation importante de la marge au cours du Pliocène, après le début de la phase d'océanisation. Cette déformation crustale post-rift en extension mais également en compression (Chanier et al., ce congrès) s'accompagne de mouvements verticaux qui provoquent notamment des basculements tardifs entraînant un glissement gravitaire de la couverture sédimentaire fragile sur le sel messinien.

### 3.5.5 (o) L'évolution mésozoïque du golfe de Valence : apport d'une approche terre - mer

Nathalie Ethève<sup>1,2</sup>, Julia Gomez<sup>3</sup>, Raquel Martos<sup>3</sup>, Dominique Frizon De Lamotte<sup>1</sup>, Eduard Roca<sup>3</sup>, Christian Blanpied<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GEC, Cergy Pontoise

<sup>2</sup>Total, Paris-La Défense

<sup>3</sup>Universitat de Barcelona, Espagne

Le golfe de Valence, situé en Méditerranée Occidentale, constitue la prolongation sud-ouest du bassin Liguro-Provençal. Son histoire cénozoïque, très étudiée, est caractérisée par une inversion Eocène en relation avec la convergence Europe-Ibérie, à laquelle se superpose une phase extensive à l'origine de grabens oligo-miocène. Ces dépôts reposent en discontinuité sur un épais bassin Mésozoïque dont l'évolution tectono-sédimentaire reste mal connue.

Ainsi, ce travail se propose de caractériser l'évolution du golfe de Valence et en particulier le bassin de Columbrets. L'objectif principal est de comprendre les relations entre le remplissage sédimentaire, les processus de subsidence et d'amincissement crustal responsables de l'architecture actuelle.

En mer, les observations effectuées sur de récentes données de sismique réflexion ont permis d'identifier une séquence Permo-triasique surmontée d'une épaisse série Jurassique supérieur à Crétacé inférieur. Ce bassin jurassico-crétacé, contemporain de nombreux autres liés à la séparation des plaques Ibérie et Europe pourrait expliquer le fort amincissement crustal systématiquement associé aux dépôts les plus épais.

A Terre, deux missions ont été réalisées de part et d'autre du bassin : dans le désert de Las Palmas (province de Valencia) et sur l'île d'Ibiza. La première a mis en évidence des failles normales liées à l'extension Jurassique puis Crétacé inférieur (Aptien probable). La seconde a révélé un système de horst et graben de même âge repris par des chevauchements d'âge Miocène en relation avec les Bétiques.

Ces premiers résultats suggèrent que l'extension Cénozoïque n'est que la reactivation d'un bassin formé majoritairement durant le Mésozoïque.

### 3.5.6 (o) Inversion tectonique post messinienne d'un bloc hérité du rifting oligocène de la marge algérienne, quantifiée par des données de sismiques réflexion et réfraction pénétrantes

David Graindorge<sup>1</sup>, Angélique Leprêtre<sup>1</sup>, Jacques Déverchère<sup>1</sup>, Frauke Klingelhoefer<sup>2</sup>, Abdelkarim Yelles<sup>3</sup>, Rabbah Bracene<sup>4</sup>, Philippe Schnurle<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IUEM, Plouzané

<sup>2</sup>IFREMER, Plouzané

<sup>3</sup>CRAAG, Alger, Algérie

<sup>4</sup>SONATRACH exploration, Boumerdès, Algérie

De nombreux paramètres favorisant l'initiation d'une subduction ont été proposés : une faille ou une zone de faiblesse préexistantes, une lithosphère pré stressée comme une marge passive, l'existence de forces aux limites compressives, une variation latérale de densité (transition océan continent TOC), une plaque continentale fine et chaude et l'âge de la lithosphère océanique. Les résultats des analyses et modélisations restent cependant contrastés. Certains des aspects de l'état tectonique initial faciliteront ou inhiberont invariablement la subduction à différents degrés. Il est donc nécessaire de se concentrer sur un site favorable. Nous proposons d'étudier le cas de la marge algérienne qui rassemble plusieurs conditions intéressantes : une lithosphère océanique jeune, des forces externes compressives, des conditions thermiques chaudes liées à la rupture du slab théthysien, une marge issue d'une ouverture arrière arc, une épaisse couverture sédimentaire et une faille ou zone de faiblesse en pied de marge (TOC). Enfin la marge résulte d'une évolution polyphasée incluant un stade de rifting précoce puis de spreading diffus, suivie d'un épisode transcurrent tardif lié à la migration vers l'ouest du domaine Alboran. Nous avons donc exploré la structure profonde du bassin et de la marge dans le secteur de Tipaza où la réactivation plio-quaternaire est prouvée. L'intégration dans cette analyse de données de sismique multitraces pénétrante migrées en temps et en profondeur, d'un modèle de vitesse et des données haute résolution permet de préciser et quantifier : 1) le début de l'inversion, 2) le proto écaillage, 3) le soulèvement différentiel plio-quaternaire du bloc de Khayr al din et 4) la géométrie de la base du sel reflétant la flexure du bassin. Finalement nous proposons un modèle de l'inversion et discutons ce résultat comme l'exemple d'un stade précoce de l'initiation d'une subduction d'un bassin résultant d'une ouverture arrière arc.

### 3.5.7 Keynote communication : Style du rifting et étapes de fragmentation de la Pangée

Dominique Frizon De Lamotte<sup>1,2</sup>, François Leparmentier<sup>2</sup>, Philippe De Clarens<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GEC, Cergy Pontoise  
<sup>2</sup>TOTAL, Paris-La Défense

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau  
<sup>2</sup>TOTAL, Paris-La Défense

La Pangée s'est formée par agglomération progressive de blocs continentaux à partir de la fin du Précambrien. Dans cette configuration de continent unique, qui a existé plusieurs fois au cours de l'histoire de la Terre, tous les continents sont réunis en un seul et occupent un demi-hémisphère limité par un grand cercle passant par les pôles. A peine formée, à la fin du Carbonifère (320 Ma), la Pangée va commencer à se fragmenter. Un premier épisode de rifting continental au Carbonifère Supérieur-Permien Inférieur conduit à la formation de la Néo-Téthys mais n'altère pas la configuration globale de la Pangée qui reste confinée dans son hémisphère. Un second épisode de rifting avorté a lieu à la transition Permien-Trias. La désintégration du super-continent se déroule ensuite en deux étapes conduisant à l'ouverture de l'Atlantique Central et de l'Océan Indien au Jurassique Inférieur puis à l'ouverture de l'Atlantique Sud au Crétacé Inférieur. En analysant de façon pragmatique les caractéristiques de premier ordre des systèmes de rifts avortés comme de ceux qui ont conduit aux ruptures océaniques, on constate que les rifts d'un âge donné partagent de nombreux attributs communs. Ces différences dans les modalités du rifting suggèrent que les mécanismes profonds qui les régissent ont été, eux aussi, différents. On discutera des hypothèses envisageables.

### 3.5.8 (o) The north Libyan margin (Cyrenaica) : A complex passive margin of the South-Tethys

Stavros Arsenikos<sup>1</sup>, Christian Blanpied<sup>2</sup>, Dominique Frizon De Lamotte<sup>3</sup>, Geoffroy Mohn<sup>3</sup>, Nicolas Chamot-Rooke<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LGE, Paris  
<sup>2</sup>TOTAL, Paris-La Défense  
<sup>3</sup>GEC, Cergy-Pontoise

The South-Tethys margin (Eastern Mediterranean) has recorded poly-phased extensional episodes since the Paleozoic, leading to the establishment of open spaces between the African and Eurasian margins. Once the African and Eurasian plates started to converge, these open spaces progressively closed, thus leading to contractional tectonics. Along the North Libyan front (Cyrenaica), the passive margin has been affected both by the initial rifting episodes and the compressional events that followed. The latter have been acute during the Late Cretaceous (Santonian) and especially during the Early Cenozoic (Eocene). The complex tectonic evolution of this margin provides valuable evidence in the effort to decipher the geodynamic history of the southern South-Tethys margin. We present here seismic interpretations, which illustrate these events and provide constraints concerning their age. Equally, we discuss the causal links of the Cenozoic compressional events in relation with the northern domains (i.e. the Hellenic subduction). Finally, we illustrate data from the offshore domain of the eastern Sirt Basin. The latter, in contrast with the Cyrenaica margin, has recorded a continuous subsidence since the Mesozoic and has recorded almost no compression evidence during the Africa/Eurasia convergence. Subsequently, we discuss this important decoupling between these domains (Sirt Basin and Cyrenaica), which remains a puzzling question in the geodynamic evolution of the area.

### 3.5.9 (o) Input of new data and concepts for the exploration of deep rifted margins

Emmanuel Masini<sup>1</sup>, Jean-Claude Ringenbach<sup>1</sup>, Aurélien Virgone<sup>1</sup>, François Sapin<sup>1</sup>, Patrick Unternehr<sup>2</sup>, Jean-François Ballard<sup>1</sup>, Raymi Castilla<sup>1</sup>, Patrick Chaffel<sup>1</sup>

Since the hydrocarbon discoveries deep-offshore Brazil (Tupi field), Ghana (Jubilee field) or Namibia (Kudu field), deep rifted margins became a major target for industry. They triggered an acquisition of high-resolution data and exploration wells never seen before that fed both exploration concepts and more fundamental rift genetic models. If these initial discoveries were exploration game changers, failures are unfortunately more common than economic discoveries and still challenge the usual approaches to define zones of interest worldwide. In numerous cases, drilling results pointed out the unexpected and highly variable evolutions of rifted segments in 3D, enhancing the necessity to develop and better integrate genetic approaches to become more predictive and hopefully successful. Better assessing the presence and evolution of petroleum plays in each rift genetic domain may help to derisk ongoing exploration along deepwater rifted margins worldwide. Beyond these points, the aim of this presentation is to show how far fundamental research and exploration issues are converging in deepwater rifted margins to challenge the current frontiers of successful exploration.

### 3.5.10 (o) Deep structure of the Santos Basin-São Paulo Plateau System, SE Brazilian margin

Mikaël Evain<sup>1</sup>, Frauke Klingelhoefer<sup>1</sup>, Philippe Schnurle<sup>1</sup>, Caesar Rigoti<sup>2</sup>, Alexandra Afilhado<sup>1,3</sup>, Afonso Loureiro<sup>4</sup>, Daniela Alves<sup>4</sup>, Massinissa Benabdellouahed<sup>1</sup>, Agnes Baltzer<sup>1</sup>, Reinhardt Fuck<sup>5</sup>, Jose Soares<sup>5</sup>, Carlos Corela<sup>4</sup>, Luís Matias<sup>4</sup>, Maryline Moulin<sup>1</sup>, Adriano Viana<sup>1</sup>, Daniel Aslanian<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IFREMER, Plouzané  
<sup>2</sup>PETROBRAS/Research and Development, Rio de Janeiro, Brésil  
<sup>3</sup>Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal  
<sup>4</sup>Instituto Dom Luiz, Lisboa, Portugal  
<sup>5</sup>Universidade de Brasilia, Brésil

The nature of the basement underlying the Santos Basin-São Paulo Plateau System (SSPS), in the SE Brazilian margin, has long been debated. Hypothesis such as thin continental crust, thick oceanic crust, and exhumed material have all been proposed based on more than forty years of geophysical data acquisition. According to a recent kinematic study, all these hypothesis can equally explain horizontal movements constrained in the region. In 2011, the SanBa seismic experiment was conducted in order to shed new light on the crustal structure and nature of the SSPS. We will present five velocity models based on the modeling of coincident reflection and refraction seismic data. These models allow us to precisely divide the SSPS in six domains. Their structure and nature will be discussed. A seventh domain, a triangular shape region of located in the SE of the SSPS, is discussed in a companion abstract by Klingelhoefer et al.

### 3.5.11 (o) Nouvelles données tectoniques contraignant les mécanismes d'ouverture du Golfe de Californie

Anna Bot<sup>1</sup>, Laurent Geoffroy<sup>1</sup>, Christine Authemayou<sup>1</sup>, David Graindorge<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LDO, Plouzané

Le Golfe de Californie (GOC) constitue une limite de plaque divergente de direction  $\sim$  N150E entre la plaque Nord-Américaine et la plaque Pacifique avec un taux d'ouverture d'environ 47mm/an selon une orientation NW-SE. La divergence oblique au sein du Golfe est supposée effective depuis l'arrêt de la subduction de la plaque Farallon sous la plaque Nord-Américaine ( $\sim$  12 Ma ; Stock and Hodges, 1989), avec début de l'accrétion océanique à partir de  $\sim$  3,6Ma (De Metz, 1995).

Des données de terrains récentes permettent d'entrevoir une nouvelle manière d'appréhender l'ouverture du Golfe de Californie en termes d'âge et de mode d'accommodation de la déformation oblique en extension. Les formations volcano-sédimentaires du Comondù datées entre 25 et 20 Ma montrent une importante déformation en extension syn-dépôt. Cette déformation orientée  $\sim$  N065E fait commencer l'extension continentale alors que la subduction était encore active. Des indices géomorphologiques et structuraux concordants mettent en outre en évidence au sud de la péninsule une déformation majeure en extension pure de direction  $\sim$  N115. Elle est associée au fonctionnement de détachements contrôlant notamment la mise en place précoce du bassin de San Jose Del Cabo au Miocène moyen à supérieur. Cette déformation serait liée à la structuration de marges passives en lien avec la propagation vers le NE de la dorsale Est-Pacifique. Ces déformations précoces jusqu'à présent non identifiées sont reprises ensuite par différentes déformations déjà caractérisées. On discutera de la variabilité des styles et directions d'extension au cours du temps lors de la formation du GOC en fonction des directions cinématiques aux limites du système.

### 3.5.12 (o) Architecture of basement highs at deep-water hyper-extended rifted margins : a comparison of fossil and present-day rifted margins

Isabelle Hauptert<sup>1</sup>, Gianreto Manatschal<sup>1</sup>, Alessandro Decarlis<sup>1</sup>,  
 Geoffroy Mohn<sup>2</sup>, Patrick Unternehr<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IPG Strasbourg

<sup>2</sup>GEC, Cergy Pontoise

<sup>3</sup>Total, Paris-La Défense

The increasing number of high quality refraction and reflection seismic surveys enables to image the crustal structure of hyperextended rift domains buried underneath thick sediments. Of particular interest are basement highs that lie oceanwards of the necking zones, referred to as « residual H Blocks » or « outer highs ». These blocks are often at deep-water and sealed by thick post-rift sediments, which make their study difficult. As a consequence, only few have been drilled and at present it is not clear how and when these basement highs form and what is their thermal and isostatic evolution. That's why we chose to study the Briançonnais domain in the Alps that we consider as a field analogue of such a basement high in a deep-water rifted margin. The aim of our study is to compare the field results with examples from the South-Atlantic and Indian oceans imaged in reflection seismic sections.

Numerous previous studies investigated the Alpine overprint of the Briançonnais domain during its emplacement in the Alpine orogen. However few studies investigated the pre-Alpine structures and the possible inter-relationship of inherited rift structures and Alpine structures ? In our study we mapped Alpine and pre-Alpine structures and studied their relationship to the observed stratigraphic evolution. The first results show that the major Alpine structures in the Briançonnais domain reactivated mainly pre-Alpine rift-related structures. The structural evolution and the change in vergence across the Briançonnais domain are likely controlled by the crustal architecture of the former rifted margin. The results of these studies will enable to propose restorations of the Briançonnais domain in the Alps that can be compared to the structures imaged across basement highs at hyperextended domains along the Atlantic and Indian margins. This approach will enable to better define

and understand the structural and stratigraphic architecture of basement highs at present-day rifted margins and to investigate their 3D evolution.

### 3.5.13 Keynote communication : Importance des processus post-orogéniques pour la formation des marges passives : influence de l'évènement Permien sur le rifting Jurassique de la Téthys Alpine

Geoffroy Mohn<sup>1,2</sup>, Benoit Pétri<sup>2,3</sup>, Emilien Oliot<sup>2</sup>, Suzon Jammes<sup>4</sup>,  
 Gianreto Manatschal<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GEC, Cergy Pontoise

<sup>2</sup>IPG Strasbourg

<sup>3</sup>Faculty of Earth and Life Sciences, VU Amsterdam, Pays-Bas

<sup>4</sup>Institute for Geophysics, University of Texas at Austin, États-Unis

Les processus de rifting amenant à la déchirure continentale succèdent généralement à un cycle orogénique. Ainsi, cette contribution a pour but de caractériser l'importance de l'héritage structural, lithologique et thermique issu des processus orogéniques et notamment post-orogénique pour la formation des marges passives.

Le domaine Alpin enregistre la transition de l'orogène varisque carbonifère, au collapse post-orogénique permo-carbonifère, puis au rifting jurassique, menant à la formation de la Téthys Alpine. En particulier, l'évolution post-orogénique permienne représente un évènement clé affectant fortement et durablement la composition, l'architecture et donc la rhéologie de la croûte continentale et du manteau sous-continental. En effet, la croûte supérieure enregistre la formation de bassins sédimentaires intracontinentaux associés à un magmatisme généralement acide, la croûte moyenne est affectée par une forte déformation et la mise en place de plutons acides et mafiques, enfin la croûte inférieure est caractérisée par un sous-placage gabbroïque localement associé à un métamorphisme de HT.

Cet héritage post-orogénique va avoir un rôle majeur contrôlant l'évolution du rifting jurassique : 1) les bassins de rift jurassique peuvent localement réactiver les structures permienes, 2) les structures tectoniques accommodant l'amincissement crustal durant le rift jurassique vont préférentiellement se localiser et réactiver des zones de cisaillement permienes, 3) les plutons mafiques permienes pourront représenter des corps rigides échappant à la déformation extensive jurassique.

En conclusion, la croûte continentale et plus généralement la lithosphère vont être fortement modifiées lors des processus post-orogéniques. Ces résultats ont des implications importantes pour la compréhension de la localisation de la déformation durant le rifting et plus généralement pour la caractérisation des mécanismes d'extension de la lithosphère continentale.

### 3.5.14 (o) The interaction between deformation and magmatism in propagating hyper-extended rift systems : Examples from the southern North Atlantic

Michael Nirrengarten<sup>1</sup>, Gianreto Manatschal<sup>1</sup>, Nick Kusznir<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IPG Strasbourg

<sup>2</sup>Geology and Geophysics, School of Environmental Sciences,  
 University of Liverpool, Royaume-Uni

Rifting is the tectonic process leading to the formation of continental rift basins, to lithospheric breakup and to the onset of seafloor spreading. This process is recorded in rifted margins as well as in large hyper-extended rift basins. However, as shown in bathymetric or gravity maps the relations between hyper-extended basins, rifted margins

and first oceanic crust are often complex. The difficulty in interpreting these domains results from the complex interaction of deformation and magmatism during the polyphase propagation of rift systems. Another problem comes from the fact that studies of hyper-extended rift systems are often limited to a 2D analysis, despite the fact that their structures are 3D and often result from a complex temporal and spatial evolution. Therefore a 4D approach is needed to understand the development and processes that are associated with their evolution.

While the divergence between North America and Europe is localized along the Mid Atlantic Ridge, prior to breakup the distribution of deformation was more complex leading to several hyper-extended rift basins. These hyper-extended, magma-poor rift systems are distributed along both sides of the southern North Atlantic Ocean and the basins show various sizes, orientations and tectonic histories. The Bay of Biscay is the most evolved basin in this system ; it formed as an oceanic V-shaped basin during latest Jurassic to Early Cretaceous time. In contrast other branches of the large Late Jurassic to Early Cretaceous southern North Atlantic rift system show only hyper-thinned crust and possible locale mantle exhumation (e.g. E and W Orphan, Porcupine, Rockall Trough). Quantification and analysis of deformation and magmatism are essential to constrain continental blocks kinematic before breakup and onset of seafloor spreading.

Our approach is based on the observation of geological and geophysical data combined with 3D gravity inversion models which estimate the crustal thickness. Preliminary results show hyper-thinned crust and rift structures oriented obliquely to later seafloor spreading suggesting that continental breakup was not strongly controlled by previous extensional events.

### 3.5.15 (o) Structural and stratigraphic variability of the African margin of the Equatorial Atlantic

Jing Ye<sup>1,2</sup>, Delphine Rouby<sup>1</sup>, Dominique Chardon<sup>1</sup>, Damien Huyghe<sup>1,2</sup>, Olivier Broucke<sup>2</sup>, François Guillocheau<sup>3</sup>, Cécile Robin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>TOTAL, Paris-La Défense

<sup>3</sup>Géosciences Rennes

The Transform Source to Sink Project (TS2P) objective is to link the evolution of the sedimentary basins of the African margin of the Equatorial Atlantic and their source areas developing on West African Craton. The Equatorial Atlantic segment varies from a normal passive margin in the North-West (Guinea), to an oblique margin (Sierra Leone and Liberia) and to a transform margin (Ivory Coast and Ghana). This evolution is associated with variation in the margin width, continental relief, drainage organization and subsidence/accumulation patterns that we analyzed using seismic data and onshore geology.

We compare syn-rift geometry and long-term stratigraphic history of each of these segments. Preliminary results in Sierra Leone and Liberia segment show that syn-rift geometries (Lower Cretaceous) are increasingly influenced by transform faults toward the South-East and the immediate post-rift Upper Cretaceous wedge is associated with a marine transgression and reactivation of transform faults. These results will then be used to estimate sediment budgets and integrated in a source-to-sink analysis where onshore denudation will be estimated by low-Temperature thermochronology.

### 3.5.16 (o) Evidences for ductile deformation of continental crust below passive margins : insight from high quality industrial seismic profiles

Camille Clerc<sup>1</sup>, Laurent Jolivet<sup>1</sup>, Jean-Claude Ringenbach<sup>2</sup>, Jean-François Ballard<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

Numerous high quality industrial seismic profiles have now been acquired along most of the world's passive margins. Stunningly increasing resolution over the past decades leads to unravel unexpected structures. These profiles present clear indications of ductile deformation of the deep continental crust, more or less localized along large-scale shallow-dipping shear zones and the Moho is also strongly sheared. These shear zones are connected to each other in an anastomosed pattern and they all show the same sense of shear compatible with the sense of motion along normal faults in the upper crust. We present some of the most striking example and discuss their implications for the time-temperature-subsidence history of passive margins. The distal domain of the non-magmatic margins is generally represented with an important banana-shaped sag basin (i.e. West African margins, Contrucci et al., 2004 ; Moulin et al., 2005). The sag basin is usually described as a vertically subsiding basin without differential tilting and resting on a highly thinned, little faulted continental crust. In contrast, we present new interpretations of seismic profiles across the West African margins showing evidences of intense syn-sedimentary tectonic activity within the Sag-basin. Sequences of low-angle normal faults horizontalizing in a hyper-stretched and ductile continental crust control a migration of the depot-center toward the ocean, in response to the horizontal extraction of the base of the continental crust and upper mantle. Finally, the hyper-thinned continental crust has undergone a ductile stretching under a cover of early syn-rift sediments, which implies a probable high thermal regime during rifting.

### 3.5.17 (o) Albertine rift, Uganda : Deformation-sedimentation-erosion relationships

Brendan Simon<sup>1,2</sup>, François Guillocheau<sup>1</sup>, Cécile Robin<sup>1</sup>, Olivier Dauteuil<sup>1</sup>, Thierry Nalpas<sup>1</sup>, Philippe Bourges<sup>2</sup>, Martine Bez<sup>2</sup>, Philippe Lays<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>3</sup>TOTAL E&P UGANDA, Uganda

Lake Albert Basin is assumed to be a classical half-graben initiated around 10 Ma and oriented NNE-SSW, with a major northwesterly bounding fault located along the western Congolese shoreline (Ebinger, 1989 ; Pickford & al., 1993).

This study aims to characterize the relationships existing between deformation, erosion, and sedimentation of the rift through time by restoring (1) the timing and amplitude of vertical movements (subsidence, uplift), (2) the geometry and paleo-environmental evolution of the sedimentary infilling and (3) the geomorphological evolution of the surrounding area and its associated erosion budget.

Seismic data and outcrops studies suggest a much more complex history than previously described. (1) The age model, mainly based on mammal fossils (Pickford et al., 1993 ; Van Damme and Pickford, 2003), is debated, but the early stage of the rift is probably Early to Middle Miocene. (2) No half-graben geometry has been characterized : the infilling consists of juxtaposed isopach tabular compartments with sharp thickness variations along bounding faults, in response of either low rate

extensional or combined strike-slip/extensional movements. The following onshore-offshore evolution is proposed :

- Middle Miocene (18-13Ma) to Late Miocene (~7Ma) : low extension - low and slightly differential subsidence - deepening from fluvio-deltaic to deep lacustrine environments - first generation of pediments.

- Late Miocene (~7Ma) to Late Pliocene (~3Ma) : combined strike-slip/extensional movements - homogenous and high subsidence - lacustrine clays interbedded with sandy flood-lobes - second generation of pediments.

- Late Pliocene (~3Ma) to Early Pleistocene (~2Ma) : Ruwenzori uplift - growth of the Ruwenzori Mountains (5000m) - high and slightly differential subsidence - deltaic to wave-dominated coast sandy deposits - pediments degradation by fluvial erosion.

- Middle-Late Pleistocene : late regional uplift and tilting - drainage inversion and present-day scarp formation.

### 3.5.18 (o) Mode de rifting en contexte magmatique : Evolution tectono-magmatique de l'Afar Central

Martin Stab<sup>1,2</sup>, Nicolas Bellahsen<sup>2</sup>, Raphaël Pik<sup>1</sup>, Dereje Ayalew<sup>3</sup>, Sylvie Leroy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

<sup>2</sup>ISTeP, Paris

<sup>3</sup>School of Earth Sciences, University of Addis Ababa, Ethiopia

Les structures extensives aux marges volcaniques sont masquées à l'observation par d'épaisses séquences volcaniques pré- et syn-break-up (SDR). Les questions à explorer sont notamment :

1) L'extension (accommodée par les failles) peut-elle expliquer l'amincissement crustal ?

2) Quel est l'effet d'un apport magmatique continu et du ré-épaississement crustal durant l'extension d'un point de vue rhéologique ?

Le rift magmatique des Afar en revanche, préserve les structures associées au rifting Oligo-Miocène.

Nous présentons ici de nouvelles données structurales et géochronologiques (U-Th/He et K/Ar) le long d'une coupe de l'Afar Central, allant des plateaux jusqu'au segment actif de Manda Hararo. Nous redéfinissons la chronologie de l'extension en Afar Central. Nous avons cartographié un dense réseau de failles à vergence continentale qui affecte les séries des trapps pré-rift fortement basculés sur lesquelles est déposée en discordance une série acide d'âge Oligocène terminal-Miocène (25-7 Ma). La phase d'extension principale est concomitante de la fin de cet épisode magmatique. Ces séries sont recouvertes en discordance par un niveau de basalte pliocène à plat. La coupe équilibrée donne un taux d'extension de surface de l'ordre de  $\beta = 2.1-2.9$ , supérieur au taux de  $\beta=1.3$  déduit de la sismique. Les implications de ces résultats sont : -Croûte trop épaisse : nous proposons que la croûte continentale en Afar Central a été ré-épaissie par sous placage magmatique et formation de SDR.

-La déformation en Afar Central est très distribuée jusqu'au Pliocène dans une bande large de 200 à 300 km qui constitue une limite de plaque diffuse, et ce jusqu'à la formation des segments magmatiques actuels.

-Les différences de style tectono-magmatique entre l'Afar Central (extension diffuse, croûte épaisse) et le segment de l'Erta Ale au Nord (Graben profond étroit, croûte mince) pourrait s'expliquer par une différence de volumes de magma apportés à la croûte durant l'extension.

-la différence de style structural entre ces deux rifts peut s'expliquer par : 1) l'apport de magma, qui affecte l'épaisseur de la croûte et la rhéologie, 2) le taux d'extension, probablement plus importante en Afar Central, 3) la distance à la province magmatique et 4) la présence d'une zone de transfert/transformante précoce entre les deux segments qui pourrait avoir contrôlé la distribution de l'activité magmatique.

### 3.5.19 (p) The MIRROR marine seismic survey : Deep crustal structure of the NW Moroccan continental margin from wide-angle and reflection seismic data

Youssef Biari<sup>1,2</sup>, Frauke Klingelhoefer<sup>1</sup>, Mohamed Sahabi<sup>2</sup>, Daniel Aslanian<sup>1</sup>, Philippe Schnurle<sup>1</sup>, Kai Berglar<sup>3</sup>, Khalid Mehdi<sup>2</sup>, Mikael Evain<sup>1</sup>, Massinissa Benabdellouahed<sup>1</sup>, Maryline Moulin<sup>1</sup>, Keith Loudon<sup>4</sup>, Christian Reichert<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IFREMER, Plouzané

<sup>2</sup>Université El Jadida, Maroc

<sup>3</sup>BGR Hanovre, Allemagne

<sup>4</sup>Université of Dalhousie, Halifax, Canada

Deep seismic data were acquired on the Atlantic Moroccan margin offshore Safi during the MIRROR cruise, a joint project between Ifremer, the Universities of Brest, El Jadida and Lisbon and the German BGR. A total 1206.05 km of reflection and wide-angle seismic profiles were acquired using 42 ocean-bottom seismometers, 15 landstations, a 7250 cu inch airgun array and a 360 channel 4.5 km seismic streamer. The network of reflection seismic profiles is additionally densified by existing datasets from three German cruises and therefore allows detailed imaging of the sedimentary and basement structures of the margin between 30 and 36°N.

Wide-angle seismic data from the MIRROR data-set consisting of five profiles parallel to the margin and two profiles perpendicular to the margin were modelled using tomographic and direct techniques. The final velocity models image the crustal and sedimentary structures of the Moroccan margin. The crust thins from 37 km thickness underneath the continent to approximately 7 km at the oceanic crust. No basin underlain by continental crust as identified in a data set to the north has been identified in the study area. The ocean-continent transition zone is about 100 km wide and characterised by a rough basement topography and high velocities in the lower crust. The reflection seismic and wide-angle data image three domains (a) the continental slope, where the sedimentary cover is heavily perturbed by salt tectonics and a few tilted fault block can be identified (b) a ocean continent 100 km wide transition zone of unknown crustal nature, characterised by a high basement roughness and velocities in the lower crust (c) a domain with typical oceanic basement and sedimentary layers. Towards the Canary Islands volcanic products can be identified in the seismic sections.

### 3.5.20 (p) Deep crustal structure across a young passive margin from wide-angle and reflection seismic data (The SARDINIA Experiment)

Maryline Moulin<sup>1</sup>, Alexandra Afilhado<sup>2</sup>, Frauke Klingelhoefer<sup>1</sup>, Daniel Aslanian<sup>1</sup>, Hervé Nouzé<sup>1</sup>, Philippe Schnurle<sup>1</sup>, Marie-Odile Beslier<sup>3</sup>, Marina Rabineau<sup>4</sup>, Estelle Leroux<sup>5</sup>, Aurelie Feld<sup>1</sup>, Audrey Gailler<sup>6</sup>, Luis Matias<sup>2</sup>, Francois Bache<sup>7</sup>

<sup>1</sup>IFREMER, Plouzané

<sup>2</sup>IDL, Campo Grande, Lisboa, Portugal

<sup>3</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>4</sup>LDO, Plouzané

<sup>5</sup>ISTeP, Paris

<sup>6</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>7</sup>GNS Wellington, Nouvelle-Zélande

The conjugate margins of the Gulf of Lions and West Sardinia represent a unique natural laboratory to address fundamental questions (e.g. on crustal thinning and on the nature of the transition zone) on the formation of continental margins because : i) these margins are young,

ii) an important amount of stratigraphic and tectonic data are available, onshore and offshore; iii) plate kinematics reconstructions are well constrained, the conjugate margins can be easily compared; iv) the presence of the Messinian reflector provides the paleo-geometry of the basin 5.3 Ma ago; v) last but not least, these margins are very close and accessible. The main goals of the SARDINIA project were to image the deep structure of a conjugate margin, to characterize the nature of the crust and to define the geometry of the basin to better constrain the opening history of the basin.

During the SARDINIA cruise, three coincident multi-channel and wide-angle seismic profiles were acquired in the Gulf of Lions area and three other profiles offshore Sardinia. A total of 57 ocean bottom seismometer (OBS/OBH) were deployed in the Gulf of Lions and 47 OBS offshore Sardinia. Two seismic profiles perpendicular to the margin were extended on land by landstations.

Final results of P-wave velocity modelling on the coincident wide-angle and multichannel profiles confirm that the margin is characterised by four distinct domains, as already seen on the tomographic results of Gailler et al. 2009 :

- 1) Onshore domain of unthinned continental crust, of about 33 km thickness;
- 2) Domain I of crustal thinning, where the crust thins from ~30 to 7 km in a width of about 150 km;
- 3) Domain II where the basement is characterised by lower crustal seismic velocities from 6.6- to 7.5 km/s. The nature of this crust is still matter of debate, and different hypotheses have to be discuss.
- 4) and Domain III of « atypical » oceanic crust, because it is thinner than normal oceanic crust (only 4-5 km) and lies deeper than can be explained by its thickness alone, which might be due to its formation as a back-arc basin. Similar structures of seismic velocities distribution are observed on the two main conjugate profiles. The only main difference on the two conjugate margins is the dimension of the transitional domain. Transitional domain is wider on the Gulf of Lion's margin (140km) than on the Sardinian's one (50km).

### 3.5.21 (p) Insight into the transitional crust across the Sardinia margin from wide-angle and near-vertical reflection seismic data

Alexandra Afilhado<sup>1,2,3</sup>, Maryline Moulin<sup>2</sup>, Philippe Schnurle<sup>2</sup>, Frauke Klingelhoefer<sup>2</sup>, Daniel Aslanian<sup>2</sup>, Hervé Nouzé<sup>2</sup>, Marie-Odile Beslier<sup>4</sup>, Marina Rabineau<sup>5</sup>, Estelle Leroux<sup>6</sup>, Aurélie Feld<sup>2</sup>, Audrey Gailler<sup>7</sup>, Luís Matias<sup>3</sup>, Francois Bache<sup>8</sup>

<sup>1</sup>Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal

<sup>2</sup>IFREMER, Plouzané

<sup>3</sup>Instituto Dom Luiz, Lisboa, Portugal

<sup>5</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>6</sup>LDO, Plouzané

<sup>7</sup>ISTeP, Paris

<sup>8</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>9</sup>GNS Wellington, Nouvelle-Zélande

The west Sardinia margin corresponds to the exact conjugate margin of the Gulf of Lion Basin, after the opening of the Liguro-Provencal Basin started about 30-35 Ma ago, by rotation of the Corsica-Sardinian block. The SARDINIA experiment acquired geophysical data using the French R/V L'Atalante in December 2006. The collected coincident wide-angle and MCS reflection seismic profiles cross the margin, from the unthinned continental crust up to the young oceanic crust, imaging the continental crust thinning geometry and the transition from continental to oceanic crust. We will present the main characteristics of its signature in the wide-angle and MCS records, discuss its impact in the resulting wide-angle models and its implications to the nature of crust.

### 3.5.22 (p) Inversion of back-arc basins : example of the Ligurian Basin, Western Mediterranean

Marie-Odile Beslier<sup>1</sup>, Françoise Sage<sup>1</sup>, Jean-Xavier Dessa<sup>1</sup>, Virginie Gaullier<sup>2</sup>, Laure Schenini<sup>1</sup>, Bernard Mercier De Lépinay<sup>1</sup>, Christophe Larroque<sup>1</sup>, Louise Watremez<sup>3</sup>, Nicole Bethoux<sup>1</sup>, Nicola Corradi<sup>4</sup>, Aurélien Bigot<sup>1</sup>, Sébastien Migeon<sup>1</sup>, Ana Ruiz-Constán<sup>5</sup>, Angélique Leprêtre<sup>6</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>2</sup>Géosystèmes, Lille

<sup>3</sup>Université du Maine, Le Mans

<sup>4</sup>Université di Genova, Italie

<sup>5</sup>Instituto Geológico y Minero de España, Granada, Espagne

<sup>6</sup>LDO, Plouzané

Mediterranean back-arc basins are often submitted to inversion along the complex Eurasian-African convergent border. We focus on the northern Ligurian margin to examine how such complex systems might deform when submitted to compressive stress. This margin of Oligo-Miocene age is submitted to contraction since at least 6 Ma. Seismicity extends as far as midway through the basin.

We use 72- and 12-channel high-resolution seismic reflection data (MALISAR 2006, FABLES 2012) and 96-channel deep-penetrating ones (MALIS 1995), interpreted together with 3D-velocity-depth models deduced from wide-angle seismic data (GROSMARIN 2008), to image the Ligurian margin and the adjacent oceanic domain. The Messinian event, well identified in the seismic stratigraphy, allows to quantify the vertical deformation over the last 5.3 Ma.

Below the margin, the contraction is characterized by folds, tilting of crustal blocks, south verging thrusts emerging at the margin toe, and by a 1500m uplift of the margin in the Imperia promontory area. Within the adjacent oceanic domain, noticeable deformation is restricted to a SW-NE oriented, 70 km long, salt walls alignment interpreted as resulting from combined deep-seated crustal and thin-skinned deformations. Although the salt walls are well expressed in the seafloor morphology, no significant vertical throw across the structure and gradual decreasing of deformation toward the structure ends are observed on the seismic data. This suggests that the deformation in the basin is moderate compared to the margin. The crustal deformation being synchronous in the oceanic and the continental domains, these different deformation amounts are likely related to different mechanical behaviours in the two domains, rather than to a recent basinward propagation of the deformation.

Thermo-mechanical models suggest that mainly two factors could control the focused deformation along the margin : (1) the locus of highest topographic gradient of the crustal interfaces, (2) the thermal contrast between the subsiding cooling oceanic domain and the uplifting warming margin. According to these models, the continental versus oceanic nature of the lithospheres would be of second order in the localization of the deformation.

### 3.5.23 (p) Thermal and gravimetric modeling of a transform-divergent interaction zone, the Demerara Plateau, French Guiana margin : architecture of continental crusts

Céline Grall<sup>1</sup>, Boris Marcaillou<sup>2</sup>, Lies Loncke<sup>1</sup>, Walter Roest<sup>3</sup>, Agnès Maillard<sup>4</sup>, Christophe Basile<sup>5</sup>

<sup>1</sup>CEFREM, Perpignan

<sup>2</sup>Université des Antilles et de la Guyane, Pointe-à-Pitre, Guadeloupe

<sup>3</sup>IFREMER, Plouzané

<sup>4</sup>GET, Toulouse

<sup>5</sup>ISTerre, Grenoble

The crustal architecture of passive margins is a key to constrain their origin and subsequent evolution, as well as their thermal subsidence. The square shaped continental Demerara Plateau, French Guiana margin, surmounts Central and Equatorial Atlantic oceanic crusts surrounding it. Bounded to the northeast by a WNW-ESE-trending transform fault segment and to both the west and the east by N-S divergent fault segments, the Demerara Plateau is a complex transform-divergent interaction zone. The aim of this study is to refine the crustal architecture of the plateau as derived from seismic data, by thermal and gravimetric modelling, and by using surface heat flow and gravimetric data as constraints on the models.

Previous studies show that the Plateau is a transform transition domain, displaying a thinned continental crust (where the Moho is at around 25-27 km depth), covered by around 3-4 km of sediments.

During the GUYAPLAC cruise (onboard R/V L'Atalante in 2003), shipboard gravimetric profiles have been acquired across the plateau. These data have been combined to satellite geodetic data to characterize with a better resolution the free-air gravimetric anomalies over the plateau. During the IGUANES cruise (onboard R/V L'Atalante in 2013) 10 surface heat flow measurements crossing the plateau have been carried out. Surface heat flow values decrease with the sediment thicknesses, suggesting that heat flow data are affected by the sediment blanketing effect of sedimentation. 2D gravimetric and thermal models have been performed for different margin geometries. Gravimetric modelling has been done by computing the gravimetric anomalies associated to the topographies of the main density interfaces (sea-water/sediment; sediment/crust; crust/lithospheric mantle). Thermal modelling take into account the blanketing effect of sedimentation, as well as the crustal stretching. Preliminary results indicate that both gravimetric and thermal values could be reasonably reproduced, only if we consider sediment thicknesses higher than previously proposed. Small wave-length residual gravimetric anomalies are observed both in models and data, and we examine whether these small wave-length anomalies could be reasonably accounted for by the flexural response of the continental lithosphere.

### 3.5.24 (p) Imaging proto-oceanic crust off the Brazilian Continental Margin

Frauke Klingelhoefer<sup>1</sup>, Mikaël Evain<sup>1</sup>, Alexandra Afilhado<sup>1</sup>, Caesar Rigoti<sup>2</sup>, Loureiro Afonso<sup>3</sup>, Daniela Alves<sup>3</sup>, Philippe Schnurle<sup>1</sup>, Angélique Leprêtre<sup>1</sup>, Maryline Moulin<sup>1</sup>, Massinissa Benabdellouahed<sup>1</sup>, Aurélie Feld<sup>4</sup>, Agnès Baltzer<sup>5</sup>, Adriano Viana<sup>2</sup>, Daniel Aslanian<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IFREMER, Plouzané

<sup>2</sup>Petrobras, Rio de Janeiro, Brésil

<sup>3</sup>Université Lisbonne, Portugal

<sup>4</sup>Genavir, Plouzané

<sup>5</sup>Geolittomer, Nantes

During the Sanba (SANTos BASin seismic transect) experiment, a combined wide-angle and reflection seismic profile has been acquired using 30 sea-bottom seismometers, a 4.5 km seismic streamer and a 8900 cu inch airgun array. The SB-3 profile crosses the southern flank of the Sao Paulo Plateau, the Sao Paulo Ridge and the easternmost Santos Basin in an east-west direction. Its eastern end is located north of the Florianopolis fracture zone and east to the Jean Charcot Seamounts, on undisturbed oceanic crust. Tomographic and forward modeling of the wide-angle seismic data reveals that the sedimentary thickness is variable with only 1-2 km on top of the Ridge and thickening to 4-5 km in the basin. Crustal thickness at the ridge is about 18 km and the relative layer thickness and velocity gradients indicate a continental origin of this ridge. The eastern Santos Basin is underlain by a crust of only 5 km thickness, characterised by high seismic velocities between 6.20 km/s in the upper layer

and 7.4 km/s in the lower crustal layer. Three hypotheses for the nature of the crust in this region are being tested. (a) thin continental crust (b) serpentinised upper mantle material (c) thin oceanic crust. As seismic velocity gradients seem to rule out a continental origin of this region, and clear reflections from the Moho can be observed in contrary to what would be predicted for exhumed serpentinised upper mantle material, we propose that the crust underlying the easternmost Santos Basin is of oceanic origin. Deviations from normal oceanic crust can be explained by accretion at a slow spreading center leading to the inclusion of serpentine into the lower crust at the onset of oceanisation.

### 3.5.25 (p) Sismicité dans le Golfe d'Aden occidental entre Novembre 2010 et Mars 2011 : Evidence d'un événement de rifting actif et interactions avec une faille transformante naissante

Hakim Ahmed<sup>1</sup>, Cécile Doubre<sup>2</sup>, Sylvie Leroy<sup>3</sup>, Kassim Mohamed<sup>4</sup>, Abalyazid Ahmadine<sup>4</sup>, Laurence Audin<sup>5</sup>, Julie Perrot<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Seismological and Volcanological Center, Yémen

<sup>2</sup>IPG Strasbourg

<sup>3</sup>ISTeP, Paris

<sup>4</sup>Observatoire Géophysique d'Arta, Djibouti

<sup>5</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>6</sup>IUEM, Plouzané

En Novembre 2010, une importante activité sismique fut enregistrée dans la partie occidentale du Golfe d'Aden, où la ride océanique orientée EW est caractérisée par des segments d'accrétion en échelon. A partir des signaux sismiques enregistrés par les réseaux permanents djiboutiens et yéménites mais aussi par des stations temporaires (ANR YOCMAL, DORA, Actions Marges), plus de mille séismes, de magnitude entre 2.1 et 5.6, ont été localisés de novembre 2010 à fin mars 2011. Une analyse détaillée de l'évolution spatio-temporelle, du contenu fréquentiel et des tenseurs des moments des séismes a permis de ré-examiner la chronologie de cet épisode, tenant compte des données bathymétriques haute-résolution et d'observations in situ. Plusieurs zones actives sont identifiées. L'activité sismique la plus intense décrit des propagations latérales à partir du centre d'un segment d'ouverture, suggérant que celui-ci est affecté par un épisode de dyking. A partir des études précédentes sur des segments émergés, en particulier de l'Afar, pour lesquels les données sismologiques sont accompagnées de données géodésiques, nous proposons que l'ouverture horizontale associée à ce segment est entre 2 et 5 m. La bonne précision des localisations obtenues permettent d'observer que l'activité affecte un unique segment alors que les segments dans cette partie de la ride se recouvrent à près de 80%. Ainsi, le système magmatique de chacun des segments est probablement déconnecté de celui des segments adjacents, malgré leur proximité. D'autres structures alignées le long de la direction N035° sont activées suite à la première intrusion. Avec plus de 7 événements de magnitude supérieure à 5.0, et de nombreux mécanismes en décrochement, nous proposons qu'une faille transformante est naissante, indiquant que la segmentation de la ride est actuellement en développement, à l'endroit où la ride change de direction et là où la transition entre une croûte continentale et océanique s'opère.

### 3.5.26 (p) Structure de la croûte des marges continentales du golfe d'Aden, de l'Afar à l'Oman, par tomographie de bruit

Félicie Korostelev<sup>1</sup>, Kees Weemstra<sup>2</sup>, Lapo Boschi<sup>1</sup>, Sylvie Leroy<sup>1</sup>, Yong Ren<sup>3</sup>, Graham Stuart<sup>3</sup>, Derek Keir<sup>4</sup>, Frédérique Rolandone<sup>1</sup>,

Abdulahakim Ahmed<sup>5</sup>, Ismail Al Ganad<sup>6</sup>, Khaled Khanbari<sup>7</sup>, Cécile Doubre<sup>8</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>ETH Zurich, Suisse

<sup>3</sup>School of Earth and Environment, The University of Leeds Leeds, Royaume-Uni

<sup>4</sup>National Oceanography Centre Southampton, Royaume-Uni

<sup>5</sup>Seismological and volcanological observatory center, Dhamar, Yemen

<sup>6</sup>Université de Sana'a, Yemen - Yémen

<sup>7</sup>Yemen Geological Survey and mineral Resources Board, Sana'a, Yemen

<sup>8</sup>IPG Strasbourg

Le golfe d'Aden est un endroit unique où l'on peut étudier les processus qui ont amené à la rupture continentale sous influence ou non d'un point chaud. En effet, ce jeune bassin présente deux marges passives peu éloignées l'une de l'autre. Son intérêt réside également dans la variation de la nature de ses marges continentales, qui sont volcaniques à l'ouest, sous l'influence du panache Afars, et non-volcaniques à l'est. Si ces deux types de marges sont bien étudiés, le passage d'un système à l'autre est encore mal connu en termes d'architecture et de processus. Nous utilisons la tomographie de bruit de fond sismique (Ambient Noise Tomography) dans le but d'obtenir une image continue de la structure de la croûte tout au long du golfe d'Aden. En effet, cette technique récente, développée durant les dix dernières années, permet d'étudier le bruit microsismique se propageant entre deux stations sismologiques en permanence. La tomographie de bruit n'est donc pas dépendante de la localisation des séismes sur le globe. Peu de stations sismologiques permanentes sont présentes le long du golfe d'Aden; cependant le projet YOCCAL a permis l'installation d'une centaine de stations au Yémen, en Oman et sur l'île de Socotra de 2009 à 2011. Au total, nous avons recueilli et traité les enregistrements de près de 190 stations, en Éthiopie, à Djibouti, au Yémen et en Oman. Les résultats obtenus sont un nouvel outil pour essayer de mieux comprendre la structure et le comportement de la croûte lors de la formation des marges continentales, avec une résolution non atteinte auparavant.

### 3.5.27 (p) Petrological, Metamorphic and Microstructural Characterization of the Eita Shear Zone and Campo-Grosina Units (Austroalpine Nappes) : New Constrains on Crustal Thinning Processes

Emilien Oliot<sup>1</sup>, Geoffroy Mohn<sup>1,2</sup>, Leila Mezri<sup>1,3</sup>, Benoit Pétri<sup>1</sup>, Cyril Juliani<sup>1</sup>, Alexandre Peillod<sup>1,4</sup>, Karel Schulmann<sup>1,5</sup>, Gianreto Manaschal<sup>1</sup>, Brice Lacroix<sup>6,7</sup>

<sup>1</sup>IPG Strasbourg

<sup>2</sup>GEC, Cergy Pontoise

<sup>3</sup>ISTeP, Paris

<sup>4</sup>Stockholms universitet, Institutionen för geologiska, Stockholm, Suède

<sup>5</sup>Centre for Lithospheric Research, Prague, République tchèque

<sup>6</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, University of Michigan, États-Unis

<sup>7</sup>Institut des Sciences de la Terre, Université de Lausanne, Suisse

Magma-poor rifted margins display contrasted crustal architectures mainly characterized by the transition between a weakly thinned continental crust (i.e. the proximal domain) to a hyper extended continental crust (i.e. the distal domain) along a necking zone. This necking zone records the abrupt thinning of the continental crust from 30 to 10 km over a region of 50-60 km wide. The Campo-Grosina units, in the Austroalpine nappes (N-Italy), preserve remnants of the necking zone from the fossil Adriatic rifted margin. Therefore these units represent a key

natural laboratory for the examination of crustal thinning processes. Integrated petrographic, chemical and microstructural approaches reveal a polyphased tectonic deformation during mid-crustal thinning and related exhumation : (i) sub-vertical foliations Sn (mainly observable in the Campo unit) are overprinted by sub-horizontal foliations Sn+1 (in the Grosina unit) during a pure shear event under amphibolite facies conditions, and (ii) mylonitization occurred in granitoids crosscut by a major greenschist facies shear zone (the Eita shear zone). Petrographic features and rheological behavior of quartzo-feldspathic rocks are associated with metamorphic / metasomatic thermodynamic reequilibration and dynamic recrystallization during extensional deformation. Thereby, mineral parageneses and geochemical reequilibration occurs in localized and distributed high-strain zones. Crystallographic preferred orientations of dynamically recrystallized quartz display a dominance of the basal slip system and show coaxial finite strain related to the activity of the major shear zone. Results provide significant relationships between mechanical and chemical processes during mid-crustal extensional tectonics.

### 3.5.28 (p) Robust Monte Carlo approach to wide-angle model uncertainty assessment

Afonso Loureiro<sup>1</sup>, Alexandra Afilhado<sup>2,3</sup>, Luís Matias<sup>1</sup>, Maryline Moulin<sup>3</sup>, Daniel Aslanian<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Dom Luiz, Lisboa, Portugal

<sup>2</sup>Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal

<sup>3</sup>IFREMER, Plouzané

Wide-angle refraction/reflection seismic crustal surveys are the main tool to image the lithosphere, providing a 2D view of the velocity field. These velocity models have a high impact on the debate of geological processes at the lithospheric scale. Thus, it is fundamental to estimate the uncertainty of the modelled layer velocities and interface depths, in order to establish the level of detail that can be achieved in its geological interpretation, namely concerning the lithology and geometry of the imaged structures. We propose VMONTECARLO, a robust algorithm to perform direct model assessment, which includes an estimate of the error bounds for each velocity and depth and a Monte Carlo simulation for computing the probability distribution of the velocity anywhere in the model. It is suited to evaluate a final model solution while also providing alternate solutions, if applied during the work-flow of wide-angle modelling. This method is suitable for both forward and inverse modelling strategies.

VMONTECARLO uses a hybrid approach of single parameter uncertainty estimation and Monte Carlo simulation to generate velocity-depth plots that provide : 1) the velocity-depth profile band that is consistent with the travel times ; 2) the random model that provides the best fit, keeping most of the observations covered by ray-tracing ; 3) insight into valid models dispersion ; 4) main model features unequivocally determined by the travel times, e.g., first order versus second order discontinuities, and velocity gradient magnitudes. This tool provides insights into the acceptable geological interpretations allowed by data and model uncertainty.

### 3.6 Géodynamique des zones de subduction océanique : Des observations aux modèles

#### Oceanic subduction zones dynamics : from observation to modelling

Cette session résulte de la fusion des deux sessions initialement proposées ci-dessous. *This session results from the merge of the two following sessions initially proposed.*

#### Géodynamique des zones de subduction océanique : Des observations aux modèles

#### Oceanic subduction zones dynamics : from observation to modelling

##### Responsables :

- Diane Arcay (Géosciences Montpellier)  
diane.arcay@gm.univ-montp2.fr
- Serge Lallemand (Géosciences Montpellier)  
serge.lallemand@gm.univ-montp2.fr
- Laurent Husson (ISTerre, Grenoble)  
laurent.husson@ujf-grenoble.fr
- Pierre Henry (CEREGE, Aix-en-Provence)  
henry@cerège.fr
- Siegfried Lallemand (GEC, Cergy-Pontoise)  
siegfried.lallemand@u-cergy.fr
- Georges Boudon (IPG Paris)  
boudon@ipgp.fr

##### Résumé :

La subduction des lithosphères océaniques et l'entraînement associé des plaques en surface sont les moteurs principaux de la tectonique des plaques terrestres. La subduction océanique fonctionne à travers un système complexe d'interactions géophysique, pétrologique et géochimique (transferts de masse et de fluides), dont la dynamique s'exprime à la fois sur le très long-terme (de l'ordre de la dizaine de Ma) et à l'échelle du cycle sismique (sur une fenêtre de quelques dizaines à centaines d'années). Les interactions entre les processus spécifiques à chacune de ces deux échelles restent très mal connues. Pourtant, les modalités de ce transfert d'échelle sont probablement fondamentales pour progresser dans notre compréhension de l'aléa sismique et volcanique associé à la subduction océanique.

Cette session a ainsi pour but de réunir des contributions portant aussi bien sur des études récentes de zones de subduction océanique (géophysiques, géochimiques, pétrologiques..) que sur la modélisation (analogue, numérique, expérimentale) des processus impliqués dans la subduction océanique. Les études du couplage lithosphère-asthénosphère, dont la dynamique est essentielle dans le fonctionnement d'une subduction, sont également les bienvenues.

##### Mots clefs :

Dynamique des subductions océaniques, interactions lithosphère-manteau, topographie dynamique, zone sismogène, magmatisme....., résultats de campagnes océanographiques, apports des modèles analogiques et numériques

##### Abstract :

The subduction of oceanic lithospheres and the associated pull exerted on plates at Earth surface are the main driving forces governing plate tectonics. Oceanic subduction develops through a complex system of geophysical, petrological and geochemical (mass and fluid transfers) interactions, involving on the one hand longterm processes (of the order of a few My), and, on the other hand, short-term dynamics occurring at the time scale of a seismic cycle (of the order of a few tens or hundreds years). Hence, numerous unknowns remain while deciphering how scale transfers operates may be crucial to better our understanding of seismic and volcanic hazards associated with oceanic subduction. This session thus aims at gathering contributions from recent studies of oceanic subduction zones (geophysical, geochemical, and petrological data) to process modeling (analogue, experimental and numerical simulations). Studies on lithosphere-asthenosphere coupling, essential in the subduction process, are also welcome.

##### Main topics :

oceanic subduction dynamics, lithosphere-mantle interactions, dynamic topography, seismogenic zone, magmatism ... oceanographic cruise results, analog and numerical modelling.

#### Marge convergente des Petites Antilles : dynamique de la zone de subduction et déformation tectonique, évolution des plateformes, sismogénèse et tsunamis

#### (Lesser Antilles convergent margin : Subduction processes and resulting tectonic deformation, platform evolution, seismogenesis, and tsunamogenic hazards)

##### Responsables :

- Boris Marcaillou (U. des Antilles et de la Guyane)  
boris.marcaillou@ird.fr
- Jean-Jacques Cornée (Géosciences Montpellier)  
cornee@gm.univ-montp2.fr
- Jean-Frédéric Lebrun (U. des Antilles et de la Guyane)  
jflebrun@univ-ag.fr
- Philippe Munch (Géosciences Montpellier)  
munch@gm.univ-montp2.fr

##### Résumé :

La convergence des plaques Caraïbes et Amérique génère une déformation tectonique hétérogène de l'arc et de l'avant-arc des Petites Antilles et un nombre de grands séismes de subduction historiques étrangement réduit. Une quiescence historique similaire a précédemment conduit à dramatiquement sous-estimer le risque sismique et tsunamique sur d'autres marges du globe. Les variations latérales des caractéristiques géodynamique le long de la marge des Petites Antilles - Obliquité de la convergence, subduction d'hétérogénéités topographiques... - entraînent des variations significatives des contraintes interpalques, de la déformation tectonique de l'avant arc, et de l'évolution paléo-environnementale des plateformes carbonatées.

Récemment plusieurs campagnes terrestres et marines, Françaises et internationales ont amené des résultats importants dans cette zone. Cette session fournira l'occasion par la présentation de ces résultats d'approfondir nos connaissances des interactions complexes entre couplage interplaque, structure de la plaque plongeante et chevauchante, déformation sismique et aismique, sédimentation et déformation de l'avant arc et des plateformes, risque et tsunamique.

**Abstract :**

Caribbean-Atlantic plate convergence at the Lesser Antilles Arc resulted in a heterogeneous arc and fore-arc tectonic evolution with an intriguing small number of large subduction earthquakes in the historical record. Similar poor records previously led to dramatically underestimate the earthquake and tsunami hazard at other convergent margins. Along-strike variations in Geodynamical pattern - convergence obliquity, topographic heterogeneities subduction... - generates significant variations in the stress and strain regime, fore-arc tectonics, and paleoenvironmental evolution of carbonate platforms. French and international marine and onland campaigns have recently provided new results about this subduction zone.

This session raises the opportunity, by confrontation with current knowledge and models, to advance our understanding of the complex interplay between interplate coupling, oceanic plate and margin structure, seismic and aseismic deformation, in the evolution of subduction zones, fore-arc and platforms sedimentation and tectonics and associated seismic and tsunamogenic hazards.

### 3.6.1 (o) New evidence for Paleogene (Proto-Caribbean?) subduction beneath the northern margin of South America : U/Pb zircon geochronology of eclogites, Puerto Cabello, Venezuela

Daniel Viete<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Science, University of California Santa Barbara, Etats-Unis

<sup>2</sup>Department of Earth Sciences, Durham University, Royaume-Uni

Subduction complexes comprising eclogite-blueschist-amphibolite rocks occur at Puerto Cabello, Villa de Cura and Margarita, Venezuela, on the northern margin of South America.

Peak high pressure/low temperature (HP/LT) metamorphism of eclogites at Margarita occurred in the Late Cretaceous (100-90 Ma : Maresch et al., 2009). Exhumation also occurred in the Late Cretaceous at Villa de Cura (c. 90 Ma : Smith et al., 1999) and Margarita (c. 90 Ma : Sisson et al., 2005), but in the Oligocene at Puerto Cabello (c. 32 Ma : Sisson et al., 2005).

Despite differences in the timing of exhumation, the Venezuelan HP/LT rocks are generally considered along-strike equivalents, relating to a single, Late Cretaceous subduction phase (e.g. Sisson et al., 2005 ; Pindell et al., 2006). Transport to and emplacement in their current-day locations was achieved by eastward retreat of the subduction zone, to form the Caribbean (Pindell et al., 2006).

New U/Pb geochronology on cogenetic zircons in eclogites from Puerto Cabello has yielded Eocene-Oligocene ages (c. 37-33 Ma) for peak HP/LT metamorphism. The subduction complex at Puerto Cabello did not form in the Late Cretaceous Caribbean Arc.

Pindell et al. (2006) proposed southward, Proto-Caribbean subduction beneath the northern margin of South America to explain the origin of Paleogene flysch deposits in northern Venezuela and Trinidad. They argued that the lithotectonic architecture of northern South America preserves a record of diachronous trench-trench collision, in which eastward retreat of the Caribbean Arc progressively consumed the Proto-Caribbean subduction zone, and emplaced both Caribbean and Proto-Caribbean Arc sequences onto South America. The new U/Pb ages from Puerto Cabello provide strong support for this model.

#### References

- Maresch et al., 2009. *Geol Soc Lond Spec Publ* 328, 705-741.  
 Pindell et al., 2006. *Geol Acta* 4, 303-341.  
 Sisson et al., 2005. *Geol Soc Am Spec Paper* 394, 91-117.  
 Smith et al., 1999. *Geol Soc Am Bull* 111, 831-848.

### 3.6.2 (o) Structure et imagerie sismique du segment sud-ouest de la zone de subduction hellénique : premiers résultats de la campagne Ulysse

Clément Vitard<sup>1</sup>, Mireille Laigle<sup>1</sup>, Philippe Charvis<sup>1</sup>, Bernard Mercier De Lépinay<sup>1</sup>, Audrey Galve<sup>1</sup>, Laure Schenini<sup>1</sup>, Alexandre Dano<sup>1</sup>, Maria Sachpazi<sup>2</sup>, Ernst Flueh<sup>3</sup>, Anke Dannowski<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>2</sup>National Observatory of Athens, Athènes, Grèce

<sup>3</sup>IFM-GEOMAR, Allemagne

La zone de subduction hellénique est caractérisée par un taux de convergence de l'ordre de 4 cm/an, et par le taux de sismicité le plus important d'Europe. Des séismes de forte magnitude (M 7.5-8) ont eu lieu le long du segment sud-ouest de la zone de subduction hellénique, au large du

Péloponnèse, au cours du 19<sup>ème</sup> et 20<sup>ème</sup> siècle. Ce segment de 400 km a probablement été le lieu de nucléation du plus important séisme historique d'Europe, en 365 ap. J.C. avec une magnitude supérieure à 8, ayant entraîné un tsunami dévastateur. Deux principaux modèles scientifiques s'opposent sur la question du couplage de l'interface de subduction, allant d'un couplage total au niveau de l'interface, à l'hypothèse opposée d'un couplage quasi inexistant. Cependant ces modèles opposés considèrent des géométries approximatives et parfois extrêmes faute de contraintes disponibles sur la structure et la géométrie de l'interplaque sous l'avant-arc dans cette zone.

La faille de méga-chevauchement et le domaine avant-arc du segment sud-ouest de l'arc hellénique ont été l'objet d'étude de la campagne Ulysse en Novembre 2012 afin de déterminer la géométrie des structures dans cette région.

Deux grands profils de sismique réfraction/réflexion de 250 km ont été collectés au cours de cette campagne jusqu'au sud de l'île de l'arc volcanique de Milos, en utilisant une source de 11000 cu.inch de l'IFREMER et 25 sismomètres ou hydrophones fond de mer de GEOMAR, auxquels s'ajoutent environ 650 km de profils de sismique réflexion le long du domaine profond avant-arc (fosses de Matapan). De la bathymétrie multifaisceaux ainsi que du Chirp ont également été acquis sur l'ensemble des profils.

Ces données sont en cours de traitement, avec l'objectif d'imager la faille de méga-chevauchement jusqu'à 40 km de profondeur ainsi que les failles actives du domaine avant-arc, afin d'identifier les marqueurs structuraux des limites inférieures et supérieures de la zone sismogénique potentielle dans cette région.

### 3.6.3 (o) Topography in subduction zones constrained by laboratory models

Flora Bajolet<sup>1</sup>, Claudio Faccenna<sup>2</sup>, Francesca Funicello<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Laboratory of Experimental Tectonics, Universita Roma Tre, Rome, Italie

The topography in subduction zones can exhibit very complex patterns due to the variety of forces operating in this setting. If we can deduce the theoretical isostatic value from density structure of the lithosphere, the effect of flexural bending and the dynamic component of topography are difficult to quantify. In this work, we attempt to measure and analyze the topography of the overriding plate during subduction compared to a pure shortening setting.

We use analog models where the lithospheres are modeled by thin-sheet layers of silicone putty lying on low-viscosity syrup (asthenosphere). The model is shortened by a piston pushing an oceanic plate while a continental plate including a weak zone to localize the deformation is fixed. In one type of experiments, the oceanic plate bends and subducts underneath the continental one ; in a second type the two plates are in contact without any trench, and thus simply shorten. The topography evolution is monitored with a laser-scanner. In the shortening model, the elevation increases progressively, especially in the weak zone, and is consistent with expected isostatic values. In the subduction model, the topography is characterized, from the piston to the back-wall, by a low elevation of the dense oceanic plate, a flexural bulge, the trench forming a deep depression, the highly elevated weak zone, and the continental upper plate of intermediate elevation. The topography of the upper plate is consistent with isostatic values for very early stages, but exhibits lower elevations than expected for later stages.

For a same amount of shortening of the continental plate, the thickening is the same and the plate should have the same elevation in both types of models. However, comparing the topography at 20, 29 and 39% of shortening, we found that the weak zone is 0.4 to 0.6 mm lower when there is an active subduction. These values correspond to 2.6 to 4 km in

nature. Although these values are high, there are of the same order as dynamic topography and could represent the dynamic effect of the slab sinking into the asthenosphere and lowering the elevation of the upper plate.

### 3.6.4 (o) Méthode de domaines fictifs pour la modélisation de l'interaction lithosphère/asthénosphère : étude des plissements des slabs à 660 km et les variations de pendage induites

Nestor Cerpa<sup>1</sup>, Riad Hassani<sup>1</sup>, Muriel Gerbault<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

L'interaction lithosphère/asthénosphère dans les zones de subduction peut être assimilée, d'un point de vue mécanique, à un problème d'interaction solide/fluide où les plaques lithosphériques ont un comportement viscoélastique tandis que le manteau asthénosphérique est un fluide visqueux. La modélisation par éléments finis de ce couplage peut alors s'avérer complexe du fait des grands déplacements de la plaque plongeante dans le manteau et des grandes déformations qu'elle y subit. On utilise une méthode de type domaines fictifs pour faciliter la discrétisation spatiale du domaine le plus déformable (i.e. l'asthénosphère). Des tests de validations en 2D et 3D ont été menés pour valider la méthode développée.

En considérant en première approximation une frontière imperméable à 660 km de profondeur, nous étudions l'influence de la viscosité du manteau sur le dépôt du slab sur cette interface.

Dans un premier temps, une application géodynamique en 2D à la subduction andine a été effectuée. En imposant aux plaques des vitesses correspondant à celles des plaques Nazca et Amérique du Sud issues de reconstructions des mouvements des plaques, nous obtenons une périodicité de plissement du slab sur la discontinuité à 660 km. Cette périodicité induit la formation cyclique de subduction horizontale et une cyclicité du régime tectonique dans la plaque supérieure. Les périodes sont en accord avec les données magmatiques et sédimentologiques connues, de l'ordre de 30-40 Ma. Ainsi, nous proposons une nouvelle explication pour cette cyclicité dans les Andes et l'horizontalisation du slab.

La modélisation 3D permet de comparer des cas de subductions orthogonales et obliques pour différentes viscosités du manteau. Nous étudions comment l'obliquité de la convergence peut expliquer les variations de pendage le long d'une marge en relation avec le plissement du slab à 660 km.

### 3.6.5 (o) Migration des fosses et déformation des plaques chevauchantes au dessus d'un manteau en convection

Laurent Husson<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

Trench motion and upper plate deformation ultimately respond to mantle flow. Herein I build upon the mantle flow model results of Conrad and Behn (2010) and compute the drag forces underneath all plates, and show that they control the dynamics of plates and plate boundaries. The small misfit angle between the traction azimuths of mantle traction and absolute plate motion corroborates the idea that convective mantle drag is a prominent driver of plate tectonics. Less intuitive is the fact that the interplay between the drag forces from the upper and lower plates, that amounts to -5 to 8.5 TN/m (per unit trench length), dictates both trench migration rates and upper plate deformation. At odds with the classic view that assigns the prime role to the

idiosyncrasies of subduction zones (slab age, interplate friction, water content etc), I find that the intrinsic properties of subduction zones in fact only modulate this behavior. More specifically, the mean value of the integrated trenchward mantle drag force from the lower and upper plates (from -2 to 6.5 TN/m) controls upper plate deformation. Conversely, it is the difference between the lower and upper plates mantle drag forces (from -3 to 10 TN/m) that controls trench migration rates. In addition, I find that a minimum trenchward force of  $\sim 2.5$  TN/m must be supplied by mantle drag before trenches can actually advance, and before upper plates undergo compression. This force results from the default tendency of slabs to rollback when solely excited by their own buoyancy, and is thus the effective tensional force that slab pull exerts on the plate interface.

### 3.6.6 (o) Ebullition explosive du méthane et mégaséismes dans les zones de subduction

Hugues Raimbourg<sup>1,2</sup>, Régis Thiéry<sup>3</sup>, Maxime Vacelet<sup>4</sup>, Claire Ramboz<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

<sup>3</sup>LMV, Clermont-Ferrand

<sup>4</sup>Laboratoire Géosciences, École nationale supérieure des mines de Paris, Fontainebleau

L'analyse des inclusions fluides dans les paléo-zones de subduction montre que jusqu'à  $\sim 300^\circ\text{C}$  le fluide baignant la roche est un mélange d'eau salée et d'une faible quantité de méthane. La présence dans de nombreux exemples de deux types d'inclusions (riche en eau et riche en méthane) implique l'immiscibilité du méthane dans l'eau en profondeur. Par ailleurs, les inclusions riches en méthane du paléoprisme d'accrétion Shimanto, au sud-ouest du Japon, enregistrent des fortes et rapides variations de pression de fluide. Une hypothèse est que ces variations brutales reflètent l'enregistrement par le fluide d'un événement sismique, qui connecterait des poches de liquide isolées et ferait chuter la pression de fluide. A ce mécanisme d'enregistrement passif des séismes par les fluides, nous proposons d'ajouter un mécanisme actif, par lequel le fluide entretient la rupture sismique. En effet, lorsque le fluide aqueux est saturé en méthane, une petite chute de pression de fluide, associée par exemple à un séisme, provoque une ébullition explosive du méthane susceptible de fracturer la roche encaissante. Cette fracturation et la dilatance qui l'accompagne permettent de propager la chute de pression initiatrice et l'ébullition explosive. L'ébullition explosive de méthane est donc un processus qui potentiellement accompagne et favorise la genèse de mégaséismes en libérant de l'énergie. Afin de valider ce modèle, nous avons étudié la production de méthane par craquage de la matière organique dans des échantillons de carottes de zones de subduction. Cette analyse montre que (1) la matière organique, bien que présente en faible quantité, est suffisamment abondante pour saturer l'eau dans les pores d'une roche sédimentaire fortement compactée et (2) la caractère sismique/asismique des zones de subduction autour du globe recouvre, de façon très grossière, une différence entre une « forte » et une « faible » productivité en méthane.

### 3.6.7 (o) Nouvelles contraintes sur l'évolution tectonique liée à la subduction à la jonction Petites et Grandes Antilles (Passage d'Anegada) à partir des données de la campagne ANTITHESES (sismiques réflexion et réfraction, bathymétrie SMF)

Muriel Laurencin<sup>1</sup>, Boris Marcaillou<sup>2</sup>, David Graindorge<sup>1</sup>, Frauke Klingelhoefer<sup>3</sup>, Mikael Evain<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IUEM, Plouzané

<sup>2</sup>Université des Antilles et de la Guyane, Pointe-à-Pitre, Guadeloupe

<sup>3</sup>IFREMER, Plouzané

La convergence des plaques Caraïbes et Américaines génère une déformation tectonique hétérogène de l'arc et de l'avant-arc des Petites Antilles. Sur tout l'arc, une apparente et relative quiescence sismique est observée et notamment un « gap » paraît présent à la transition entre les Grandes et les Petites Antilles, au sud du passage d'Anegada, au plus fort de la courbure de l'arc antillais. La détermination de la structure de la zone de subduction et en particulier la déformation avant arc est une approche fondamentale pour comprendre la sismicité locale. Dans ce cadre, la formation et l'activité tectonique du passage d'Anegada, relié à ses extrémités à deux bassins majeurs (le bassin des Iles Vierges et de Sombrero) restent controversées.

En décembre 2013, la campagne Antithesis a permis d'acquérir 4 profils de sismique grand-angle, 10 profils de sismique réflexion et un relevé bathymétrique complet de la marge des Petites Antilles du Nord. Ces données fournissent un nouvel éclairage sur l'évolution tectonique et l'activité sismologique de cette zone.

Les nombreuses rugosités crustales de la plaque plongeante associées à un remplissage de fosse très fin impactent la structure du front de la marge et du prisme d'accrétion ancien et inactif. Notamment, des lanières de prisme, bordées par une faille décrochante se découpent sous l'influence, très probablement, de l'obliquité de la subduction.

Le bassin de Sombrero est fortement asymétrique et la composition de la croûte semble identique de part et d'autre. L'étude des dépôts sédimentaires du bassin permettent d'identifier deux phases de dépôts affectés par d'anciens événements extensifs et verticaux de la croûte. La troisième phase de dépôts est relativement calme confirmée par une actuelle activité tectonique et sismologique réduite dans le passage d'Anegada. Nos résultats préliminaires suggèrent un partitionnement limité au prisme d'accrétion et le domaine avant-arc semble peu impacté par l'obliquité de la convergence. Cette interprétation qui reste à confirmer est cohérente avec les données géodésiques récentes qui indiquent un fort découplage interplaque.

L'activité tectonique ancienne du nord du Passage d'Anegada semble globalement scellée et cette faille majeure disparaît dans le bassin de Sombrero sans atteindre le front de déformation remettant en cause l'existence d'une micro-plaque de Porto-Rico / Iles Vierges.

### 3.6.8 (o) Apport de l'étude des bassins de l'avant arc des Petites Antilles à la géodynamique de la subduction Antillaise

Jean-Frédéric Lebrun<sup>1</sup>, Lyvane De Min<sup>1</sup>, Jean-Jacques Cornée<sup>2</sup>, Philippe Munch<sup>2</sup>, Boris Marcaillou<sup>1</sup>, Arnauld Heuret<sup>1</sup>, Jean-Lén Léticée<sup>1</sup>, Fabienne Zami<sup>1</sup>, Yves Mazabraud<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier à l'Université des Antilles et de la Guyane, Pointe à Pitre, Guadeloupe

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier

Le Projet KaShallow a permis l'étude des structures tectono-sédimentaires des bassins et des plateformes carbonatées de l'avant arc des Petites Antilles sur la période Néogène. Nos analyses sismostratigraphiques et géomorphologiques dans le bassin de Marie-Galante (région centrale de l'avant arc des Petites Antilles), confortées par l'étude stratigraphique des plateformes carbonatées des îles de l'avant arc, ainsi qu'un échantillonnage systématique en mer, nous permettent de décrire l'évolution des mouvements verticaux et l'histoire tectonique de l'avant arc depuis l'Oligocène. Cette reconstitution temporelle et spatiale des déformations de l'avant arc permet de hiérarchiser les événements tectoniques cassants et flexuraux qui affectent les bassins et nous conduit à discuter les causes probables de leurs origines dans les processus géodynamiques affectant la zone de subduction des Petites Antilles.

### 3.6.9 (o) Evolution tectonique et histoire de la déformation de l'Archipel des Saintes

Chrystelee Verati<sup>1</sup>, Jean-Marc Lardeaux<sup>1</sup>, Michel Corsini<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

L'archipel des Saintes, localisé au sud-est de la Basse-Terre, est constitué de roches volcaniques caractéristiques des séries calco-alcalines d'arc insulaire dont les âges s'échelonnent de 5 à 0,6 Ma. L'analyse structurale des failles mesurables à terre dans les différentes îles qui constituent cet archipel a été réalisée. Elle permet de mettre en évidence quatre familles de directions structurales : (1) une famille de direction N05-N20, (2) une de direction N50-N70, (3) une de direction N90-N110, (4) une famille de direction N130-N150. Trois des quatre générations de failles reconnues sont caractéristiques du champ de déformation finie décrit depuis plusieurs années en Guadeloupe (Corsini et al., 2011, Lardeaux et al., 2013). En effet, le système de failles orientées N50-N70 correspond à la vallée de la Désirade et aux grands escarpements qui bordent la partie nord de cette île, le système de failles orientées N90-N110 correspond au rift de Marie-Galante et le système de failles d'orientation N130-N150 est compatible en direction et en cinématique avec le grand système extensif et décrochant de Montserrat-Bouillante. Seul le système de failles d'orientation N05-N20 est pour l'instant peu documenté à l'échelle de l'archipel guadeloupéen, bien que certaines failles orientées N0-N20 aient été décrites en Basse-Terre de Guadeloupe (faille de la Soufrière). L'histoire de la déformation que nous mettons en évidence aux Saintes confirme l'existence de plusieurs épisodes de déformation et de déplacements antérieurs au champ de déformation actuel. Les systèmes de failles, orientés N50-N70, N90-110 et N130-150, reconnues comme des structures tectoniques actives, correspondent à la réactivation tectonique de structures précoces, d'âge Pliocène pour les failles d'orientation N90-110, et d'âge Crétacé pour les failles d'orientation N50-70 et N130-150.

### 3.6.10 (p) Dynamique long-terme du domaine interplaque des zones de subduction : Influence des paramètres rhéologiques et géodynamiques

Diane Arcay<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier

Les caractéristiques mécaniques du domaine interplaque d'une zone de subduction affectent ses propriétés sismogènes, sensibles à l'échelle du cycle sismique, mais aussi le comportement d'ensemble de la subduction qui est, lui, régulé à l'échelle de la dizaine de Ma. La relation entre les deux échelles de temps est encore très peu étudiée, notamment parce que la dynamique long-terme de l'interplaque reste très mal comprise. Cette étude porte sur l'état thermo-mécanique de l'interplaque à l'équilibre, dépendant à la fois du modèle rhéologique choisi (propriétés des domaines cassant et ductile) et des variables géodynamiques locales (taux de subduction, âge de la plaque subduite, pendage de la subduction). On s'intéresse ici aux variabilités de la longueur de l'interface interplaque et de l'extension du domaine cassant potentiellement sismogène. Les simulations numériques intègrent les interactions entre les deux lithosphères convergentes et le manteau convectif, en combinant rhéologie cassante et rhéologie ductile non-Newtonienne fonction de la température, de la pression et de la teneur en eau. Les résultats montrent que la profondeur de la transition cassant-ductile le long de l'interplaque dépend principalement de la friction du milieu composant le chenal. L'extension maximale en profondeur de l'interplaque, quant à elle, croît si : la résistance asthénosphérique augmente ; si le contraste

de résistance interplaque/manteau croît; et si le volume d'activation du manteau croît. Dans le cas de très faibles frictions interplaque, la transition cassant-ductile a alors lieu à l'extrémité du plan interplaque. Concernant les paramètres géodynamiques, de faibles taux de subduction enfouissent la transition cassant-ductile interplaque et la longueur totale du chenal, contrairement à la relation intuitive. Des lithosphères subduites âgées tendent à enfouir la transition cassant-ductile, mais raccourcissent cependant la longueur totale interplaque. Enfin, le modèle simule les transferts d'eau associés à la déshydratation de la plaque plongeante et la chute de résistance du manteau hydraté. Cette perte de résistance du manteau métasomatisé, en amplifiant les écoulements asthénosphériques, modifie fortement la géométrie de l'interplaque et la position de la transition cassant-ductile. Les caractéristiques de l'interplaque simulée seront discutées par rapport aux cas naturels.

### 3.6.11 (p) Numerical simulation of subduction and accretionary processes in South-Central Chile

Béatrice Cailleau<sup>1</sup>, Alexey Petrunin<sup>2</sup>, Stephan Sobolev<sup>2</sup>, Andrey Babeyko<sup>2</sup>, Johannes Glodny<sup>2</sup>, Onno Oncken<sup>2</sup>, Charlotte Krawczyk<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Free University of Berlin, Allemagne

<sup>2</sup>Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences Telegrafenberg, Potsdam, Allemagne

<sup>3</sup>Leibniz Institute for Applied Geophysics, Hannover, Allemagne

The Coastal Cordillera in South Chile is characterised by a 2500 km long metamorphic belt. The Western Series unit, around 38°-42° S latitudes and focus of our study, is observed at least from the coast to 60 km inland and is thought to be up to 30 km thick. The unit represents a mélange of continent-derived clastic material and of oceanic rocks, basally accreted and later exhumed due to surface erosion. Most material of the Western Series indicates metamorphism under high pressure / low temperature conditions, at a depth of roughly 25-30 km. Seismic experiments in this area show reflectors reminiscent of a stack of nappes that are oriented either parallel to the subduction interface or sub-horizontally. The process of accretion probably began during an early stage of subduction about 300 Ma ago and spanned a period of about 90 Myr.

To better understand the formation of the accretionary prism, we have performed numerical experiments using the finite element code LAPEX 2D. The model includes an elasto-visco-plastic rheology as well as plastic strain softening and surface erosion. Modelling shows that the partitioning into frontal and basal accretion depends on the amount of surface erosion, subduction zone geometry and the rheology of the oceanic and continental crust. Given sufficiently weak upper oceanic crust, the accretionary processes may be long-lived and may extend over a large area against the continental buttress until the load on the slab is high enough to open the subduction channel.

### 3.6.12 (p) The Calabrian subduction zone (Ionian Sea) : Historical seismicity and a new review of the system from multi-channel seismic data

Flora Gallais<sup>1</sup>, Marc-André Gutscher<sup>2</sup>, David Graindorge<sup>3</sup>, Laurine San Pedro<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IFREMER, Plouzané

<sup>2</sup>LDO, Plouzané

<sup>3</sup>IUEM, Plouzané

The Calabrian subduction zone is included in the long W-E elongated compressive South Mediterranean belt. This subduction accommodates the African/Eurasian convergence at a very slow rates (<5 mm/y). The presence of shallow to deep earthquakes (down to 500 km depth) under Calabria and the South East Tyrrhenian Sea images a 70°NW dipping slab, associated with an active volcanic arc : the Aeolian Islands. But no thrusts events characteristic of active subduction have been recorded during the instrumental era. However, the South Calabrian/East Sicilian region is well-known to have been affected by strong historical seismicity. The sources of these events is often linked to the activity of crustal, normal faults in the Calabrian region. But the origins of two of the most destructive earthquakes (1169 and 1693) remain enigmatic. For the 1169 and 1693 Catania earthquakes, the source faults are linked alternatively to the activity of the Malta escarpment or of the subduction fault plane (because of the isoseismals are open to the sea).

To seek evidence of activity of Calabrian system, we present results from reprocessed 96-channels seismic reflection profiles (Archimede cruise, 1997) offshore Sicily. We identify a thick sedimentary cover (>5km) in the Ionian Abyssal Plain overlying an oceanic crust : Mesozoic and Tertiary sequences, a Messinian unit and the Plio-Quaternary deposits. Crossing the external Post-Messinian Calabrian prism, the Messinian units is thickened from 1400 m in the Ionian Abyssal Plain to 2400 m in the prism. We interpret this thickening as accretion of the Plio-Quaternary and Messinian units due to the activity of anticlines and thrusts, which are recognized on all profiles orthogonal to the deformation front of the prism.

Additional work is in progress based on the CIRCEE cruise (oct. 2013) to study the Calabrian subduction with new MCS seismic data, sediment coring and dating to study the turbidites in order to estimate recurrence of strong earthquakes and better constrain the seismic hazard in South Italy. Additional work is the DIONYSUS cruise (oct. 2014, F/S Meteor) to acquire wide-angle seismic data on the Calabrian accretionary wedge.

### 3.6.13 (p) Caractérisation of global subduction seismicity

Arnaud Heuret<sup>1</sup>, Francesca Funiciello<sup>2</sup>, Claudia Piromallo<sup>3</sup>, Debora Presti<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier et Université des Antilles-Guyane. Campus de Fouillole, Guadeloupe

<sup>2</sup>Laboratory of Experimental Tectonics, Roma, Italie

<sup>3</sup>Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma, Italie

<sup>4</sup>Dip. Scienze della Terra, Univ. di Messina, Italie

In the framework of the EURYI Project « Convergent margins and seismogenesis : defining the risk of great earthquakes by using statistical data and modelling », we propose the first global overview of subduction seismicity. Previous studies have been focused on interplate seismicity, intraslab seismicity, upper plate deformation, or relation between interplate and intraslab seismicity, but the 3 categories of subduction seismicity have been never approached in a systematic and exhaustive study.

Nodal planes and seismic moments of worldwide subduction-related earthquakes with magnitude  $M_w > 5.5$  have been extracted by CMT Harvard catalogue for the period 1976 - 2007 and combined with EHB hypocenter locations. For each subduction zone, a set of trench-normal, vertical transects was constructed, spaced 1 degree along the trench. For each of the 505 resulting transects, first the seismicity not related to the subduction process under investigation was removed. Then the events previously identified by Heuret et al (2011) as subduction interface earthquakes were singled out. Afterwards the upper plate seismicity (i.e. earthquakes generated within the upper plate as a result of the subduction process) was selected. The remaining events were identified as

intraslab earthquakes. Following Heuret et al. (2011) the 505 transects were merged into 62 larger segments, ideally homogeneous in terms of seismogenic zone characteristics. For each subduction around the world, interplate, intraslab and upper plate seismicity have been estimated and compared to each other through several parameters (seismic rate, moment released rate, maximal expressed magnitude) in order to obtain a snapshot on the general behaviour of global subduction-related seismicity. In a second step, the seismological parameters have been compared to long-term geodynamical parameters (e.g., subduction velocity, plate and trench absolute motions, slab age, thermal parameter and geometry, sediment thickness at trench) with the aim to find possible cause-effect relationships.

### 3.6.14 (p) Aléa sismique dans l'arc des petites Antilles : résultats préliminaires d'une expérience de positionnement précis offshore

Pierre Sakic<sup>1</sup>, Valérie Ballu<sup>1</sup>, Anne Deschamps<sup>2</sup>, Helen Piete<sup>2</sup>, Jérôme Ammann<sup>2</sup>, Guy Woppelman<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LIENS, La Rochelle  
<sup>2</sup>IUEM, Plouzané

L'arc des petites Antilles est situé à proximité d'une frontière de plaques en subduction et de ce fait, l'aléa sismique y est important. Pourtant, peu de grands événements ont été recensés, ce qui peut être lié à la nature de la zone ou à la trop courte période d'observation. Actuellement, nous n'avons pas les éléments pour écarter définitivement la possibilité d'un futur méga-séisme tsunamigénique.

Un réseau de surveillance GNSS est installé sur l'ensemble des îles Caraïbes (Guadeloupe et Martinique notamment). Cependant, les terres émergées étant loin de la fosse ; la configuration n'est pas optimale pour mesurer le signal de déformation lié à l'éventuel blocage entre les deux plaques. Les techniques qui se développent en géodésie de fond de mer, en particulier le GPS/Acoustique (GPS/A), doivent permettre de se rapprocher de la fosse pour observer la déformation au plus près du contact entre les plaques.

La technique GPS/A permet de déterminer à un instant donné la position de balises acoustiques installées de façon pérenne au fond de l'océan, et ainsi observer d'éventuelles déformations. Ces balises sont interrogées par ondes acoustiques sous-marines depuis une plate-forme à la surface (bateau, bouée ...), elle-même localisée précisément par GNSS. On mesure le temps de propagation de l'onde acoustique a ?n d'en déduire la position absolue de la balise.

Nous présentons ici des simulations numériques de mesures GPS/A ayant pour objectif d'évaluer la précision que l'on peut attendre au large des Antilles. La méthode de traitement et l'estimation de l'incertitude sur le positionnement est validée à partir de données acquises en rade de Brest en avril 2014. Les traitements GNSS en cinématique sont effectués par différentes méthodes (différentiel en temps réel, différentiel en post-traitement et Positionnement Ponctuel Précis) afin d'évaluer les performances dans différentes conditions et en particulier loin des côtes comme ce sera le cas aux Antilles.

### 3.6.15 (p) Les Petites Antilles du Nord, une zone de subduction à faible couplage interplaque ? Un nouvel éclairage tectono-structural et thermique fourni par la campagne ANTITHESIS

Boris Marcaillou<sup>1</sup>, Frauke Klingelhofer<sup>2</sup>, Jean-Frédéric Lebrun<sup>1</sup>, David Graindorge<sup>3</sup>, Hélène Bouquerel<sup>4</sup>, Marianne Conin<sup>5</sup>, Jacques

Crozon<sup>2</sup>, Lyvan De Min<sup>1</sup>, Béatrice De Voogd<sup>6</sup>, Mikaël Evain<sup>2</sup>, Arnold Heuret<sup>1</sup>, Mireille Laigle<sup>4</sup>, Serge Lallemand<sup>7</sup>, Muriel Laurencin<sup>3</sup>, Francis Lucazeau<sup>4</sup>, Thibaut Pichot<sup>4</sup>, Christophe Prunier<sup>3</sup>, Frédérique Rolandone<sup>8</sup>, Dominique Rousset<sup>6</sup>, Clément Vitard<sup>9</sup>

<sup>1</sup>LARGE, Guadeloupe

<sup>2</sup>IFREMER, Plouzané

<sup>3</sup>IUEM, Plouzané

<sup>4</sup>IPG Paris

<sup>5</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>6</sup>IPRA, Pau

<sup>7</sup>Géosciences Montpellier

<sup>8</sup>ISTeP, Paris

<sup>9</sup>GEOAZUR, Sophia-Antipolis

Le long de la marge des Petites Antilles du Nord (Guadeloupe - Iles Vierges) l'obliquité de la convergence des plaques Caraïbes et Amérique du Nord augmente fortement. Cela soulève la question de l'influence de cette augmentation d'obliquité sur le couplage interplaque et au-delà sur la déformation tectonique et son éventuel partitionnement et sur la sismogénèse. En effet, aucun consensus n'existe dans la littérature concernant le partitionnement de cette marge, et notamment le rôle tectonique du Passage d'Anegada. Par ailleurs la sismicité est très hétérogène, fréquente au nord du Passage d'Anegada (Iles Vierges), rare au Sud (Saint Martin). Cette quiescence sismique peut-être l'expression d'un très fort couplage interplaque ou au contraire d'un segment de marge peu couplé comme suggèrent les données Géodésiques récentes.

L'absence de données d'imagerie Géophysique sur ce segment de marge rendait toute discussion autour de la déformation tectonique et de la sismogénèse de ce segment de marge nécessairement spéculative. La campagne Antithesis 1 (Nov 2013-Janv 2014) à bord des navires océanographiques Atalante et Pourquoi Pas ? a permis l'acquisition des premières données de sismique grand angle de sismique réflexion 360-traces et de flux de chaleur ainsi qu'une carte bathymétrique complète de ce segment de marge.

L'acquisition et les premiers traitements fournissent des résultats préliminaires qui suggèrent que :

1/ le partitionnement de la déformation tectonique est limité au prisme d'accrétion et le domaine avant-arc est peu impacté par l'obliquité de la convergence.

2/ le Passage d'Anegada est une structure héritée peu active à l'heure actuelle qui s'amortit et disparaît dans le bassin de sombrero sans atteindre le front de déformation, ce qui semble peu avec une limite de micro-plaque Porto-Rico / Iles Vierges.

3/ Le contact interplaque dans le segment de marge de Saint Martin est caractérisé par des températures anormalement froides par rapport aux autres segments de la marge des Petites Antilles. Ces températures froides et un coin mantellique peu profond sont de nature à réduire drastiquement l'étendue de la zone sismogène, ce qui est compatible avec le faible couplage que laisse supposer les données géodésiques récentes.

### 3.6.16 (p) La frontière décrochante Nord Caraïbe : trace actuelle et héritage structural

Jordane Corbeau<sup>1</sup>, Frédérique Rolandone<sup>1</sup>, Sylvie Leroy<sup>1</sup>, Nadine Ellouz-Zimmermann<sup>2</sup>, Bernard Mercier De Lépinay<sup>3</sup>, Bertrand Meyer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison

<sup>3</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

La frontière entre les plaques tectoniques Caraïbe et Amérique du Nord se caractérise par un mouvement transpressif, dû à la collision oblique ayant lieu entre ces plaques. Ce mouvement transpressif est partitionné et accommodé dans la région d'Hispaniola le long de deux grandes

structures décrochantes sénestres qui encadrent une zone de chevauchements. De nouvelles données de bathymétrie et de sismique réflexion ont été récemment acquises (Haïti-SIS) le long de la frontière décrochante Nord Caraïbe entre la Jamaïque et Hispaniola, dans le Passage de la Jamaïque où est localisée la faille Enriquillo-Plantain-Garden (EPGF). L'analyse de ces données révèle la complexité tectonique et stratigraphique de la frontière Nord Caraïbe. Des corrélations sismiques avec les études marines et terrestres antérieures sont proposées dans le but de replacer les séquences sismiques identifiées dans le contexte tectonique régional. Les Carib Beds (horizons typiques Caribbéen A", B" et V) sont imagés dans la partie Sud de la zone d'étude, démontrant que la Grande Province Magmatique Caribbéenne est présente à l'extrême Nord-Est de la ride du Nicaragua inférieure. Les séquences stratigraphiques typiques des demi-grabens de la marge passive Est du système Cayman sont identifiées dans plusieurs bassins, mettant en évidence la présence de zones réactivées. La faille décrochante EPGF recoupe récemment et de façon linéaire ces bassins pré-existants et ne constitue pas la limite entre les deux domaines crustaux ayant des rhéologies différentes. L'héritage tectonique ne semble pas jouer un rôle majeur dans la localisation et la propagation de la faille EPGF. Le bassin asymétrique de Navasse résulte du mouvement décrochant du segment central de la faille EPGF. L'initialisation de ce segment est estimée à environ 8 Ma d'après les profils sismiques et le taux de sédimentation du bassin de Navasse.

### 3.6.17 (p) Frontière Nord de la plaque Caraïbe : le système de failles décrochantes d'Haïti

Sylvie Leroy<sup>1</sup>, Nadine Ellouz-Zimmermann<sup>2</sup>, Jordane Corbeau<sup>1</sup>,  
 Bernard Mercier De Lépinay<sup>3</sup>, Bertrand Meyer<sup>1</sup>, Frédérique  
 Rolandone<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison

<sup>3</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

Lors des campagnes océanographiques HAITI-SIS1 et 2 - NorCaribe (2012-2013), nous avons cartographié en détail les systèmes de failles Nord et Sud constituant la frontière entre les plaques Caraïbes et Amérique du Nord, respectivement la faille Oriente-Septentrional (OFZ) et Enriquillo-Plantain Garden (EPGF). Les données bathymétriques ont révélé deux escarpements de failles peu connues en mer. Le système Sud, responsable du tremblement de terre meurtrier de Haïti, du 12 Janvier 2010 court sur plus de 1100 km depuis l'axe d'accrétion du fossé de Cayman jusqu'à la fosse de Muertos. Le second est au nord d'Haïti depuis le même axe d'accrétion Cayman jusqu'à l'est de la république Dominicaine. Nous montrons que les escarpements de failles ne sont pas obscurcis par des dépôts récents et peuvent être suivi sur toute la longueur de la faille, confirmant leur caractère actif. Le déplacement total sur la faille Nord est estimé à 16.5 km grâce au marqueurs constitués par les canyons décalés. Si l'on considère la vitesse de déplacement mesurés par le GPS de 9 mm/an constante, l'âge du décalage est estimé à 1.8 Ma. Sur le segment Sud EPGF, un seul bassin asymétrique est actif pendant le fonctionnement de la faille que l'on estime à 8 Ma grâce à sa dimension, son remplissage sédimentaire et le taux de sédimentation moyen dans la région.

Le rôle du grain structural antérieur à la mise en place des décrochements et leur développement est testé. Les données semblent indiquer que si certaines structures sont réactivées d'autres sont recoupées. Sur la faille OSFZ, un ancien bassin pull-apart est traversé par le décrochement actif, et comme sur la EPGF, les blocs basculés et bassins riftés Paléocène contemporains de l'ouverture du fossé Cayman, sont recoupés par les systèmes actifs.

### 3.7 Subduction et orogènes

#### Responsables :

- Delphine Bosch (Géosciences Montpellier)  
delphine.bosch@gm.univ-montp2.fr
- Stéphane Guillot (ISTerre, Grenoble)  
stephane.guillot@ujf-grenoble.fr
- Joseph Martinod (GET, Toulouse)  
joseph.martinod@get.obs-mip.fr
- Yann Rolland (GEOAZUR, Sophia Antipolis)  
yann.rolland@unice.fr
- Julia de Sigoyer (ISTerre, Grenoble)  
sigoyer@biotite.ens.fr
- Philippe Yamato (Géosciences Rennes)  
philippe.yamato@univ-rennes1.fr
- Philippe Agard (ISTeP, Paris)  
philippe.agard@upmc.fr

#### Résumé :

La subduction exerce un contrôle majeur sur la tectonique des plaques et l'évolution géologique de notre planète. Cette session vise à faire le point des recherches en cours concernant le processus de subduction au sens large (subduction océanique, subduction continentale, obduction, ...), ses répercussions sur les mécanismes de construction des chaînes de marges active et l'évolution précoce des orogènes. Il s'agit d'une session ouverte aux chercheurs de toutes les disciplines des Sciences de la Terre s'intéressant à la dynamique des zones de subduction actives ou fossiles, que ce soit à l'échelle de temps du cycle sismique ou aux échelles de temps géologiques. L'approche proposée pourra être :

- géophysique (imagerie des zones de subduction),
- pétrologique et géochimique (analyse métamorphique des roches de HP-UHP, géochimie des fluides et du signal magmatique, géochronologie),
- tectonique (comportement et évolution des chaînes de marge active),
- tectonique active (contraintes apportées par la sismologie et la géodésie sur le comportement actuel des zones de subduction)
- modélisatrice (géodynamique du processus de subduction, transition subduction-collision)

L'objectif de cette session pluridisciplinaire est d'aboutir à une vision la plus complète possible des mécanismes à l'oeuvre au sein des zones de subduction.

### 3.7.1 (o) Mouvements verticaux de la plaque sud-américaine en réponse à la dynamique de la subduction océanique

Joseph Martinod<sup>1</sup>, German Aguilar<sup>2</sup>, Sébastien Carretier<sup>1</sup>, Benjamin Guillaume<sup>3</sup>, Riad Hassani<sup>4</sup>, Vincent Regard<sup>1</sup>, Rodrigo Riquelme<sup>5</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile, Santiago, Chili

<sup>3</sup>Géosciences Rennes

<sup>4</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>5</sup>Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chili

Depuis le Crétacé supérieur, l'avancée de la plaque sud-américaine en direction de la zone de subduction s'est accompagnée de la formation de la Cordillère des Andes, dont le relief résulte surtout de la tectonique compressive qui entraîne épaissement crustal et amincissement de la lithosphère sous certaines parties des Andes centrales. Des mouvements verticaux se produisent également au pied des Andes dans la zone d'avant-arc, ainsi que dans les bassins d'avant-pays situés de l'autre côté de la chaîne. Ces mouvements ne résultent pas seulement de la tectonique et de la flexure de la plaque continentale sous le poids des Andes. Ils constituent également une réponse en surface aux variations de la dynamique de la subduction. Nous observons à l'aide de modèles numériques et analogiques la façon dont la subduction modifie la topographie de la plaque continentale. La subduction de plateaux océaniques a joué un rôle majeur dans le soulèvement de l'avant-arc, la croissance de la chaîne, et la dynamique des bassins situés de l'autre côté de la Cordillère. La vitesse de convergence exerce également un contrôle sur les mouvements verticaux du continent particulièrement sensible dans la zone d'avant-arc. Les périodes d'accélération de la convergence se traduisent par la subsidence de la zone d'avant-arc, comme par exemple au Miocène sur la côte du Chili, tandis que le ralentissement de la convergence entraîne la surrection de l'avant-arc qui s'observe actuellement sur la plus grande partie de la côte Pacifique d'Amérique du sud. Ces mouvements verticaux liés à la dynamique de subduction ont une ampleur modeste si on les compare à la hauteur de la Cordillère, mais ils jouent un rôle majeur de part et d'autre de la chaîne dans la dynamique continentale et l'enregistrement sédimentaire associé.

### 3.7.2 (o) Surrection et subsidence dynamique des chaînes de montagne : l'Himalaya

Laurent Husson<sup>1</sup>, Matthias Bernet<sup>1</sup>, Stéphane Guillot<sup>1</sup>, Pascale Huyghe<sup>1</sup>, Jean-Louis Mugnier<sup>1</sup>, Anne Replumaz<sup>1</sup>, Xavier Robert<sup>1</sup>, Peter Van Der Beek<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

In many mountain belts, the record of uplift and subsidence in mountain belts is often at odds with crustal tectonics and shortening history. In the Himalayas, fast surface uplift and exhumation of the Himalayas and Tibet and fast subsidence in the foreland basin portrays at first glance the Neogene tectono-morphic evolution of the Indian-Eurasian collision zone. Canonical explanations require a complex combination of lithospheric flexure and removal of the mantle lithosphere. Transient dynamic topography is an alternative mechanism that jointly explains all observations. At present-day, our mantle-flow model derived from seismic tomography shows that dynamic topography over the southward folded Indian slab could be responsible for the modern location of the foreland depocenter. Backwards in time, our kinematic reconstructions suggest that the stretched Indian slab detached from the Indian plate during indentation of the Eurasian plate, and gradually drifted southward underneath the Indian continent. We model the impact of the southward

drift of the Indian slab on dynamic topography and show that this drift is accompanied by a southward migration of the dynamic deflection of the topography. Transient effects essentially show a prominent surface uplift of the Himalayas of ~1000 m during Early to Mid Miocene, and a 6000 m subsidence of the foreland basin during the last 15 m.y. Transient dynamic topography thus explains both the uplift history of the Himalayas and subsidence in the Siwaliks basin, without any need for removal of the lithospheric mantle nor for the elastic flexure of the Indian plate.

### 3.7.3 (o) Seismicity and geodynamics in the central Vanuatu arc, focus on a ridge subduction

Christian Baillard<sup>1</sup>, Wayne Crawford<sup>1</sup>, Valérie Ballu<sup>2</sup>, Marc Régnier<sup>3</sup>, Bernard Pelletier<sup>4</sup>, Esline Garaebiti<sup>5</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>LIENSs, La Rochelle

<sup>3</sup>GEOAZUR, Sophia-Antipolis

<sup>4</sup>Institut de la Recherche et du Développement - Nouméa, Nouvelle-Calédonie

<sup>5</sup>Geohazards Vanuatu, Vanuatu

The central part of the Vanuatu arc is characterized by the subduction of the d'Entrecasteaux ridge under the North Fiji Basin. By analyzing the hypocenters from a local microseismic catalog (2008-2009) and global catalogs we show that the subduction interface, in the first 50 km depth, presents a small dipping angle where the ridge is subducting. This bump highlights the buoyancy of the ridge associated to the excess of fluids present in the seamount. This underplating could explain 20% to 60% of the vertical displacement estimated on the forearc islands from corals datations and that can reach a maximum of 6 mm/yr. The high concentration of hydrous minerals in the subducting ridge might also explain the important activity of intermediate depth earthquakes (half of the total activity in the studied region), we observed a very good correlation between the supposed extension of the ridge in depth and the location of these earthquakes. We propose that they are associated to crust minerals dehydration that causes hydrous fracturation trough preexistent faults. This dehydration process is maintained to a maximum depth of 190 km due to the high thermal parameter of the Australian plate. However, the subduction of the ridge doesn't seem to influence the downdip limit of the seismogenic zone, this limit, at ~50 km +/- 10 km, is invariant from North to South in the studied area.

Using the geometry of the Wadati-Benioff plane derived from earthquakes localisations, we established a 2D mechanical model to explain the horizontal interseismic displacement observed by GPS on islands of the upper plate. We show that the subduction interface alone cannot explain the GPS velocities observed, the system of thrust faults located below the back arc islands of Maewo and Pentecôte, plays a major role in the region geodynamics and accommodate as much convergence as the subduction interface (between ~16 and ~34 mm/yr). Using the model we were also able to explain the closing of the Aoba basin during interseismic phase (~25 mm/an). Finally, the mechanical model suggests the existence of a 23 km wide locked patch that reaches the trench.

### 3.7.4 (o) La côte du Chili entre 26 et 32°S, témoin d'un changement de dynamique de l'avant-arc au cours du Pléistocène

Joseph Martinod<sup>1</sup>, Vincent Regard<sup>1</sup>, German Aguilar<sup>2</sup>, Sébastien Carretier<sup>1</sup>, Benjamin Guillaume<sup>3</sup>, Gérard Hérail<sup>1</sup>, Laetitia Leanni<sup>4</sup>, Rodrigo Riquelme<sup>5</sup>, Sonia Rouse<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile, Santiago, Chili

<sup>3</sup>Géosciences Rennes

<sup>4</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>5</sup>Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chili

Un des traits les plus marquants de la côte du Chili entre 26 et 32°S est l'omniprésence de marqueurs géomorphologiques témoins du soulèvement Pléistocène du continent. Il s'agit soit de successions de terrasses d'abrasion marines, soit d'anciennes plages, qui se retrouvent à des altitudes pouvant atteindre 400 mètres. Les terrasses d'abrasion se forment lors des haut-niveaux marins correspondant aux périodes interglaciaires pléistocènes (stades isotopiques impairs). La terrasse supérieure est en général plus large que les autres. Elle présente également une morphologie plus lisse, qui contraste souvent avec la morphologie hérissée d'écueils des terrasses inférieures qui ont pourtant été élaborées sur la même lithologie. Ce contraste de morphologie pourrait marquer une périodicité différente des alternances entre périodes chaudes et froides. Il suggère aussi que la terrasse supérieure s'est formée sur une longue période, pendant plusieurs épisodes interglaciaires successifs, alors que la vitesse de soulèvement du continent était très faible. Les terrasses inférieures, en revanche, sont apparues alors que la côte se soulevait rapidement. Les datations par isotopes cosmogéniques de ces niveaux de terrasses montrent que la reprise du soulèvement s'est produite au cours du Pléistocène. La morphologie des vallées fluviales suggère également une reprise pléistocène du soulèvement de l'avant-arc. Les vitesses de soulèvement déduites de ces datations sont en accord avec celles obtenues par d'autres méthodes comme des datations U-Th sur coquilles. Elles varient le plus souvent entre 0,1 et 0,4 mm/an. La présence de sédiments marins d'âge Miocène préservés sur la côte de cette région confirme également que l'avant-arc ne s'est pas soulevé progressivement au cours du Cénozoïque en parallèle à la croissance de la Cordillère des Andes, mais au contraire qu'il s'agit d'un événement épisodique qui affecte la côte du Chili depuis moins d'un million d'années.

### 3.7.5 Keynote communication : Past Tethyan geodynamics since the Jurassic and mantle convection

Laurent Jolivet<sup>1</sup>, Claudio Faccenna<sup>2</sup>, Philippe Agard<sup>3</sup>, Dominique Frizon De Lamotte<sup>4</sup>, Armel Menant<sup>1</sup>, Pietro Sternai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>Università Roma Tre, Rome, Italie

<sup>3</sup>ISTeP, Paris

<sup>4</sup>GEC, Cergy Pontoise

The dynamics of mantle convection and its relation to plate motion and plate boundary deformation has been so far mostly studied through numerical modeling but as the rheology of the mantle is not precisely known, testing the models is difficult. If one could relate deep convection with the geological evolution recorded through time, one may have access to time constants of convection cycles, slab penetration and slab detachment, tearing. We look for such possible connexions in the tectonic history of the Tethys Ocean. The tectonic history of the Neo-Tethys ocean and of the mountain belts formed during its progressive closure are characterized by (1) the fragmentation of southern continental masses and fast northward drift of smaller continents that end up subducting and colliding with the southern margin of the northern continents, (2) one major compressional event in the Late Cretaceous leading to generalized obduction on the northern margins of Africa and Apulia

contemporaneous with generalized compression in the northern part of Africa and part of Eurasia and (3) opening and closure of backarc basins formed within the southern margin of Eurasia, especially in the Mediterranean region. Based on reconstructions and a synthesis of various indicators of mantle convection, such as plate velocities, oceanic lithosphere production or super plumes activity, we discuss a model describing the relations between lithospheric-scale geodynamics in the Tethys region and mantle convection cycles, slab penetration and detachments. We propose that the fragmentation of Africa (Apulia, Arabia) resulted from the drag of the underlying mantle flowing northward and that the Late Cretaceous compressional event and large-scale obduction resulted from the penetration of the Tethyan slab in the lower mantle. The non-coaxial component induced by basal drag induced the underthrusting of the old and cold continental mantle below the younger oceanic mantle, leading to obduction.

### 3.7.6 (o) Tectonic accretion and recycling of the continental lithosphere during the alpine orogeny along the Pyrenees

Olivier Vanderhaeghe<sup>1</sup>, Alexia Grabkowiak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GéoRessources, Nancy

The goal of this paper is to identify the fate of the continental lithosphere along the Iberia-Eurasia convergent plate boundary. The present-day volumes of crust and lithosphere beneath the Pyrenees and the volume of eroded crust redistributed in neighboring basins are evaluated based on available geological and geophysical data. The volumes that are expected to have transited across the former plate boundary are modeled taking into account Iberia-Eurasia convergence and making assumptions regarding the initial lithospheric and crustal structure of the plate boundary at the onset of continental collision (~83 Ma).

The difference between the initial and present-day lithospheric structures suggests that at 83 Ma, either the Iberia-Eurasia plate boundary was marked by a zone of thinned lithosphere (oceanic and/or continental), or the lithosphere having transited across the plate boundary has for the most part been recycled into the mantle.

At the crustal-scale, our computation suggests that at least 30% (and as much as 63%) of the continental crust has subducted with the Iberian lithospheric slab and has been recycled into the mantle.

The current day Pyrenees are characterized by (i) an elliptical-cone-shaped mountain range underlain by an elliptical-cone-shaped crustal root pointing down, and (ii) two tongues of lithospheric mantle in the central part of the belt. These features are interpreted as reflecting redistribution of the lithospheric mantle and of the orogenic crust by ductile flow after subduction and tectonic accretion. We propose that following a period of subduction/collision from 83 to 35 Ma, decrease in the Iberia-Eurasia convergence rate favored thermal relaxation of the Iberian slab promoting ductile flow and the development of gravitational instabilities. We suggest that the orogenic root has been dragged down by the dense lithospheric root and that part of it has been recycled into the mantle. In this view, the current-day lithospheric tongues represent the remnants of the lithospheric root after thermal relaxation and recycling by convective removal.

### 3.7.7 (o) Discovery of metamorphic diamonds in garnets from the Edough massif (northeastern Algeria) : Evidence for Miocene N-dipping subduction of Africa

Renaud Caby<sup>1</sup>, Olivier Bruguier<sup>1</sup>, Dalila Hammor<sup>2</sup>, Laure Fernandez<sup>1</sup>, Delphine Bosch<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Géosciences Montpellier*

<sup>2</sup>*Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie*

Diamond inclusions occur in garnets from the Edough Metamorphic Core Complex near Annaba in Northeastern Algeria. The garnet megacrysts up to 10 cm across are embedded in actinolite schist adjacent to ultramafic boudins hosted by mylonitic calc-silicate gneiss, marbles, kyanite metapelites and anatexites. This assemblage occurs in the low-angle mylonitic band that delineates the base of the allochthonous Kef Lakhhal mafic complex. This 1 km thick slab of amphibolites and pyri-garnites, derived from layered gabbros of MORB affinity, rests above granite-gneisses from the core complex. Garnet-forming reactions and dehydration melting relate to the oldest metamorphic stage recognized in the Kef Lakhhal mafic complex ( $\geq 800$  °C,  $\geq 17$  Kbar). The diamond-bearing garnets (alm52-56 pyr33-34 gro10-11 spe01) display a dense oriented network of acicular rutile exsolutions. Diamonds, up to 50 mm across, were identified first by optical microscopy and later by Raman spectroscopy. The diamonds are preferentially concentrated in domains containing trails of prismatic rutile and apatite. The size of diamond and the epitaxial crystallization of acicular zircon preclude that these are extraneous and mechanically incorporated within microcracks during polishing. Since no quartz nor graphite are observed, the garnet megacrysts with significant contents in TiO<sub>2</sub> = 0.20% and Na<sub>2</sub>O = 0.5%, are considered to be fossilized from  $\geq 120$  km depth and probably derived from majoritic garnet. It is proposed that the incorporation in the mantle of slices of continental rocks from the northern edge of Africa is related to a Miocene N-dipping subduction. Taking into account that mantle slices were incorporated in the granite-gneiss core around 18 Ma, we discuss a possible tectonic scenario for the fast vertical exhumation coeval with fast cooling rate  $\geq 370$  °C/Ma recorded by crustal units of the Edough Massif.

### 3.7.8 (o) Positioning the peridotite massifs of north-eastern Algeria in the geodynamic evolution of the Western Mediterranean : A geochemical and geochronological study

Laure Fernandez<sup>1</sup>, Delphine Bosch<sup>1</sup>, Olivier Bruguier<sup>1</sup>, Dalila Hammor<sup>2</sup>, Patrick Monié<sup>1</sup>, Nicolas Arnaud<sup>1</sup>, Renaud Caby<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Géosciences Montpellier*

<sup>2</sup>*Université Badji-Mokhtar, Algérie*

The dismembered fragments of the Alpine belt recovered in various places around the Mediterranean basin are witnesses of the collisional events between Africa and Eurasia and of the opening of the western Mediterranean basins during the Cenozoic. In the eastern part of North Algeria, basic and ultrabasic rocks outcrop in the Edough massif, which belong to the internal zone of the Magrebes. Preliminary works [Bosch & al., 2014] from this area have proposed that both amphibolites from Kef Lakhhal and metagabbros from Bou Maiza correspond to components formed in a back-arc basin environment.

This study is focused on the petrology, geochemistry and geochronology of the mantle rocks from Kef Lakhhal (KL) and Sidi Mohamed (SM) areas in order to constrain their origin and age and, thus to propose a suitable scenario for their evolution in time and space during the Cenozoic. The peridotites show a wide range of Mg number, mainly between 82 and 89.6 with lower values measured for the Kef Lakhhal peridotites. The amphibolites from Kef Lakhhal are mostly magnesio-hornblende and par-gasite. Garnets from amphibolites range from almandine to grossular. Amphibolites display MORB-type REE patterns evolving from slightly depleted to enriched patterns ( $0.5 < La/SmN < 2$ ,  $0.6 < La/Yb < 3$ ). Peridotites present flat CHUR-normalized REE profiles with a marked negative Eu anomaly for KL samples. The Nd and Hf isotopes for both amphibolites and peridotites can be separated into two distinct batches. A

first group shows a typical DMM signature for Nd and Hf isotopes with Sr isotopic ratios more or less modified by seawater impact. A second group yields significantly lower Nd and Hf isotopic values (down to 0.512200 and 0.28207, respectively) combined with higher Sr isotopic ratios (up to 0.7147). These values suggest participation of an enriched component similar to detrital sediments, which is also supported by Pb isotopes.

The Ar-Ar and U-Pb ages (in progress) will help decipher the evolution of these different components and appear as essential in order to replace the NE Algerian massifs in the geodynamical evolution of the western Mediterranean during the Cenozoic.

### 3.7.9 (o) Tectono-metamorphic evolution of the Neoproterozoic Iri-ir-Khzama oceanic arc complex (Moroccan Anti-Atlas) : Insights into Pan-African subduction-accretion processes

Antoine Triantafyllou<sup>1</sup>, Julien Berger<sup>2</sup>, Hervé Diot<sup>3</sup>, Nasser Ennih<sup>4</sup>,  
 Christophe Monnier<sup>3</sup>, Gaëlle Plissart<sup>3</sup>, Jean-Marc Baele<sup>1</sup>, Sara Vandycke<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Université de Mons, Belgique*

<sup>2</sup>*GET, Toulouse*

<sup>3</sup>*LPG, Nantes*

<sup>4</sup>*Université Chouaib Doukkali, El Jadida, Maroc*

The studied area consists from North to South of the Khzama ophiolitic sequence (dated at c. 762 Ma [1]), the Iri-ir unit (protolith dated at c. 743 Ma and metamorphic age at c. 663 Ma [2]) and the Tachakoucht metavolcanics. The contact between the Khzama ophiolitic unit and the Iri-ir-Tachakoucht arc remnants is marked by a southward thrust fault.

The Iri-ir formation, composed mainly by hornblendites, metabasalts and partially molten metadacitic gneisses, has been interpreted as migmatites formed at the root of an oceanic arc [2]. Our new field and metamorphic investigations show that the contact between the Tachakoucht gneisses (metadacitic plagioclase-biotite-garnet-quartz porphyroclastic gneisses) and the Iri-ir complex is marked by a progressive increase of hornblendite and metabasaltic intrusions northward. The described migmatization grouped in « Iri-ir formation » is not a consequence of collisional metamorphism but rather linked to the emplacement of hornblendites. The 743 Ma age is thus interpreted as the volcanic eruption of the Tachakoucht gneiss precursor while the 663 Ma event could represent the intrusion of hornblendites.

Phase diagram calculations and thermobarometry on Tachakoucht gneisses show that, after sub-aerial emplacement, these shallow volcanics has been buried; recording a prograde P-T path through garnet compositional zoning and medium-pressure peaks under amphibolite facies conditions ( $\sim 700$  °C, 5-8 kbars), probably in response to early accretion of an oceanic arc. The hornblendites, characterized by typical oceanic arc geochemistry, then intruded the metamorphosed complex around 660 Ma. Burial of the Tachakoucht rocks and in particular, the intrusion of these hornblenditic plugs led to localized partial melting of the Tachakoucht metadacitic gneisses. Traces of oceanic arc magmatism are thus probably disconnected in time (743 and 660 Ma) and likely support two distinct subduction events that have then been structured during arc-WAC collision.

[1] Samson et al., 2005

[2] Thomas et al., 2002

### 3.7.10 (o) Zircon megacryst from a Neoproterozoic eclogite of Central Hoggar (Algeria) : U-Pb, trace elements and oxygen isotope data

Olivier Bruguier<sup>1</sup>, Renaud Caby<sup>1</sup>, Khadidja Ouzegane<sup>2</sup>, Abderhamane Bendaoud<sup>2</sup>, Delphine Bosch<sup>1</sup>, Etienne Deloule<sup>3</sup>, Jean-Robert Kienast<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier

<sup>2</sup>Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene,

Alger, Algérie

<sup>3</sup>CRPG, Nancy

<sup>4</sup>IPG Paris

The Egéré/Aleksod Terrane in Central Hoggar contains high-pressure metasediments closely associated with garnet amphibolites and eclogites. According to thermodynamic calculations, peak condition of the eclogitic stage is  $\sim 800^{\circ}\text{C}$ , 15-17 kbar followed by retrogression at  $\sim 830^{\circ}\text{C}$ , 13 kbar and cooling to  $\sim 525^{\circ}\text{C}$ , 8 kbar. The investigated sample, a coarse-grained leucocratic rock interlayered within kyanite-garnet metapelites, is a high-pressure aluminous leucosome. It contains an euhedral zircon megacryst of c. 3mm long, included in perthitic K-feldspar and in contact with white mica on one side. The megacryst shows oscillatory zoning, and a HREE-enriched pattern characterized by a positive Ce anomaly and no negative Eu anomaly, consistent with crystallisation from a melt. The low Th/U ratio ( $\text{Th}/\text{U} < 0.003$ ) is best explained by coeval crystallisation of minerals which partition Th against U (e.g. apatite) in a small melt volume. Ti-in-Zrn thermometry indicates that the center of the megacryst crystallised at  $811 \pm 15^{\circ}\text{C}$  whereas a thin (<50mm) rim displays a lower temperature of  $717^{\circ}\text{C}$  in agreement with results from Zr-in-Rt thermometry which yields a temperature of  $702 \pm 24^{\circ}\text{C}$  for the crystallisation of rutile. Oxygen isotopes yield high  $\delta 18\text{O}$  values ( $\delta 18\text{O}$  ranging from 8.9 to 12.3) indicating involvement of fluids of supracrustal origin. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of the center of the grain provides an age of  $654 \pm 5$  Ma, which indicates that the megacryst grew either at the peak of eclogitic metamorphism or during the first stages of retrograde metamorphism and decompression. This age is significantly older than exhumation of the Western Hoggar eclogites ( $623 \pm 2$  Ma, Berger et al., 2014) or than the age of subduction of the eastern passive margin of the West African Craton (620-615 Ma, Jahn et al., 2001). This suggests a westward younging of high-pressure events which is consistent with multiple subductions in the Trans-Saharan Belt.

### 3.7.11 (o) A LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronological transverse through the Adrar des Iforas (Mali) : Sampling an active continental paleo-margin

Delphine Bosch<sup>1</sup>, Olivier Bruguier<sup>1</sup>, Renaud Caby<sup>1</sup>, Dalila Hammor<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier

<sup>2</sup>Université de Badji Moktar, Annaba, Algérie

During the Pan-African orogeny, the Tuareg Shield resulted from the amalgamation of more than twenty terranes comprising Neoproterozoic juvenile oceanic terranes and reworked or well-preserved Archean and Paleoproterozoic crustal blocks. All these amalgamated terranes are limited by important trans-continental N-S shear-zones. Their main relative movements resulted from a northern transpressional tectonic escape due to their squeezing between the East Saharan craton (ESC) to the east and the West African craton (WAC) to the west. This configuration hampers E-W tectonic correlations through the shield, but gives rise to major issues including the way along which amalgamation of the terranes occurred, their origin and their respective tectonometamorphic evolution.

In order to unravel the tectonometamorphic evolution of the westernmost part of the shield, this study focused on the laser ablation LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology and Sm-Nd model ages of samples from key lithologies through the Adrar des Iforas (Mali). For example, in the Central Iforas Belt a porphyroid granodiorite yields a U-Pb zircon age of  $716 \pm 6$  Ma (2s), which reflects arc-related calc-alkaline magmatism along an active continental paleo-margin. In the Aguelhoc area, zircons from a granitoid gave an age of  $634 \pm 8$  Ma (2s), in the range of the abundant arc-related pre-collisional calc-alkaline batholiths. This continental arc magmatism developed upon a pre-Pan-African gneissic basement, mainly composed of Paleoproterozoic units but which also contains late-Archean to Archean units. Moreover, a garnetite from a granulitic unit similar to the Iforas Granulitic Unit (IGU), yields metamorphic low Th/U zircons with a  $207\text{Pb}/206\text{Pb}$  age of  $1988 \pm 5$  Ma (2s) interpreted as dating high-grade metamorphic conditions. This rock also contains inherited grains with ages broadly ranging from c. 2.4-2.5 Ga, which substantiates the occurrence, in the Central Iforas Belt, of a Late Archean-Early Proterozoic crustal component involved in magma genesis.

### 3.7.12 (o) Modeling the equilibration volume in eclogite by micro-mapping approach, evidence for dehydration at high-pressure (Kyrgyz Tianshan, Central Asia)

Chloé Loury<sup>1</sup>, Pierre Lanari<sup>2</sup>, Yann Rolland<sup>1</sup>, Stéphane Guillot<sup>3</sup>, Clément Ganino<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>2</sup>Institut für Geologie, Universität Bern, Suisse

<sup>3</sup>ISTerre, Grenoble

Understanding geodynamic processes in subduction zones and mountain belts relies on the reconstruction of precise pressure-temperature (P-T) paths from metamorphic rocks. Most P-T paths are obtained using quantitative thermobarometry such as forward thermodynamics models. The question of the scale of the equilibration volume is of prime importance because its chemistry is used as an input for the calculation of P-T sections. For chemically heterogeneous rocks, containing different mineral assemblages and/or a high proportion of zoned minerals, the concept of local effective bulk (LEB) is essential. Here we show how standardized X-ray maps can be used to estimate the scale of the equilibration volume in an eclogite sample.

The study area lies in the carboniferous South-Tianshan suture (Central Asia Orogenic Belt). We use the micro-mapping approach to unravel the P-T path of a mafic eclogite containing mm-scale garnet porphyroblasts. Quantitative compositional maps of a garnet and its surrounding matrix are obtained from standardized X-ray maps processed with the XMapTools program (Lanari et al, 2014). By using these maps we measured the LEB corresponding to the different stages of garnet growth. The equilibration volume is then modeled using the local compositions combined with Gibbs free energy minimization. Our model suggests that 90% of present garnet and 10% of present matrix composition represent the chemical composition of the initial equilibration volume. P-T sections are then calculated for following stages of growth taking into account the fractionation at each stage of garnet growth by changing the system composition.

The obtained P-T path involves a burial and exhumation along a cold geothermal gradient suggesting a rapid subduction and exhumation. The results show that the chemical zonation in the garnet mantle is due to dehydration at high-pressure. This dehydration leads to fluid circulation and could generate slab fractionation and thus initiate the exhumation.

### 3.7.13 (o) Crustal-scale structure of South Tianshan : Implications for subduction polarity and Cenozoic reactivation

Yann Rolland<sup>1</sup>, Chloé Loury<sup>1</sup>, Stéphane Guillot<sup>2</sup>, Pierre Lanari<sup>3</sup>,  
 Olivier Bruguier<sup>4</sup>, Delphine Bosch<sup>4</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>2</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>3</sup>Institut für Geologie, Universität Bern, Suisse

<sup>4</sup>Géosciences Montpellier

The South Tianshan mountain belt is the highest intra-continental mountain belt on earth (with elevations up to 7400M). The reasons for strain localization some 1000 km north of the Himalayan Belt lies in the favourable reactivation of the Late Paleozoic structures formed during the amalgamation of the Central Asian Orogenic Belt.

Still, the structure and tectonic history of this mountain belt are poorly understood. Based on new structural and petrological investigations we propose two crustal scale cross-sections of the Kyrgyz South Tianshan and correlations of main faults and units from Kyrgyzstan to China. The overall structure corresponds to a double-verging mountain belt. Both Kyrgyz and Chinese areas show identical structure and metamorphic histories. To the west, the Atbashi range comprises high-pressure oceanic and continental units stacked by north-verging thrusts above low-pressure and unmetamorphosed accretionary prism. HP gneisses are bound to their south by a south-dipping detachment exhibiting mantle relics. The HP oceanic and continental units underwent similar P-T paths culminating at 500°C-25 kbar, followed by a rapid exhumation. The overall south-dipping structure and kinematics indicate a south-dipping subduction of the South Tianshan Ocean at 320-310 Ma ending with the docking of the Tarim to the Kazakh continent. To the east, the Pobeda massif shows a narrow push-up structure. A major north-verging thrust exhumes deep crustal level granulites, which constitute the highest summits, thrust towards the north onto low-grade Devonian-Carboniferous schists. The southern part of South Tianshan is made of a south-verging thrust stack, which were formed later during the still ongoing post-30 Ma reactivation phase.

### 3.7.14 (o) Deep crustal structure in southern Mongolia inferred from geophysical and geochemical data

Alexandra Guy<sup>1</sup>, Karel Schulmann<sup>1,2</sup>, Vojtech Janoušek<sup>1</sup>, Robin Armstrong<sup>3</sup>, Alla Dolgoplova<sup>3</sup>, Reimar Seltmann<sup>3</sup>, Ondrej Lexa<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Centre for Lithospheric Research, Prague, République tchèque

<sup>2</sup>IPG Strasbourg

<sup>3</sup>Center for Russian and Central EurAsian Mineral Studies,  
 Department of Earth Sciences, Natural History Museum, London,  
 Royaume-Uni

<sup>4</sup>Institute of Petrology and Structural Geology, Faculty of Science,  
 Prague, République tchèque

Knowledge of the vertical structure and the composition of accretionary orogens is crucial for understanding the continental growth mechanisms. The Central Asian Orogenic Belt (CAOB), an accretionary orogen, covers the south of Mongolia and is traditionally interpreted as a collage of a large number of accreted terranes. Following this statement, southern Mongolia should consist of five types of crust (shield, back-arc, magmatic arc, passive margin, oceanic crust) with distinct thicknesses and different crustal compositions as suggested by historical works. Consequently, this petrological and chemical heterogeneity should be reflected also by the geophysical properties. Recent geophysical investigations show that this is not always the case and that the vertical boundaries between individual terranes do not reach the Moho depth

particularly in between the Lake, Gobi-Altai and Trans-Altai zones. We combined gravity filtering and modelling with petrological character and geochemistry of granitic rocks to investigate the lower crust underlying this critical part of the CAOB. The filtering results reveal that between the upper crustal and the mantle layers occurs a zone of homogeneous signal in which the terrane boundaries cannot be delineated. The forward modelling shows that this layer may not be composed of high density lower crustal material like gabbros or mafic granulite. The geochemistry analyses establish that the nature and the tectonic affinity of the lower crust sampled by the Carboniferous-Permian granites are juvenile material Cambrian in age. We proposed that the remnants of a huge Cambrian magmatic arc located to the north make an appropriate source for granites which suggests a redistribution of arc derived material into the area below the Gobi-Altai and the Trans-Altai zones during the early Carboniferous. The most likely lower crustal flow mechanism is the equilibration of excess of gravity potential energy between thickened area and adjacent oceanic type thin crust.

### 3.7.15 (o) Analyse structurale de la Nappe des Péridotites de Nouvelle-Calédonie

Benoit Quesnel<sup>1</sup>, Pierre Gautier<sup>1</sup>, Philippe Boulvais<sup>1</sup>, Michel Cathelineau<sup>2</sup>, Maxime Drouillet<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

<sup>2</sup>GéoRessources, Nancy

<sup>3</sup>Koniambo, Koné, Nouvelle-Calédonie

La Nouvelle-Calédonie fournit un des exemples de complexe d'obduction les mieux préservés au monde. Récemment, l'ouverture d'un site minier sur le massif de Koniambo, dans le nord de l'île, nous a permis d'avoir accès à des affleurements d'une qualité exceptionnelle dans la Nappe des Péridotites. Nous présentons ici une étude structurale originale caractérisant l'évolution verticale et temporelle de la déformation au sein de la nappe.

Le taux de serpentinitisation est croissant du haut vers le bas du massif. Corrélativement, trois niveaux structuraux ont pu être identifiés. Sous la surface d'altération représentée par les latérites nickelifères, la partie supérieure de la nappe, épaisse d'au moins 400 m, est peu serpentinitisée et affectée d'un réseau très dense de fractures fortement inclinées. Les failles sont minéralisées par deux polymorphes de la serpentine, l'antigorite (précoce) et la serpentine polygonale (tardive) toutes deux post-lizardite. L'analyse des populations de failles syn-antigorite et syn-serpentine polygonale documente un étirement maximal sub-horizontale WNW-ESE et un ellipsoïde en constriction, puis un raccourcissement maximal sub-horizontale NW-SE et un ellipsoïde en aplatissement, respectivement. Dans la partie intermédiaire de la nappe, épaisse de ~200 m, la déformation est caractérisée par des zones de cisaillement chevauchantes de distribution ~hectométrique, minéralisées en serpentine polygonale et magnésite (MgCO<sub>3</sub>), associées à un raccourcissement sub-horizontale NE-SW. Enfin, le long de la semelle de la nappe, très serpentinitisée et épaisse de ~200 m, la déformation est diffuse et intense. Des zones de cisaillement de distribution ~décamétrique, soulignées par la serpentine polygonale et synchrones de la formation de veines de magnésite, indiquent un cisaillement tangentiel vers le SW.

La déformation enregistrée le long de la semelle et au sein du niveau intermédiaire de la nappe est attribuable à l'obduction. La déformation cassante exprimée dans la partie supérieure de la nappe reflète une évolution tectonique antérieure, de signification indéterminée pour l'instant.

### 3.7.16 (o) Roches ultramafiques du Bassin de Sivas (Turquie) : Implications sur la dynamique de la Néotéthys en Anatolie

Etienne Legeay<sup>1,2</sup>, Jean-Claude Ringenbach<sup>2</sup>, Geoffroy Mohn<sup>3</sup>,  
 Charlie Kergaravat<sup>1,2</sup>, Haluk Temiz<sup>4</sup>, Jean-Paul Callot<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>3</sup>GEC, Cergy Pontoise

<sup>4</sup>Department of Geology, Cumhuriyet University, Sivas, Turquie

La carte géologique de Turquie montre une grande quantité d'affleurements de roches océaniques et mantelliques. Ces séries ne correspondent pas toutes à des séquences ophiolitiques typiques et témoignent d'une paléogéographie téthysienne complexe. Leur mise en place au Crétacé supérieur traduit la fermeture de petits bassins et l'amalgamation de plusieurs blocs continentaux.

Le Bassin de Sivas se situe à la jonction de trois domaines crustaux : les Pontides au Nord, la plateforme Anatolide - Tauride au Sud, et le Complexe Cristallin Centre Anatolien à l'Ouest. Ce bassin s'est développé sur la suture de la branche Nord de la Néotéthys. La série sédimentaire est caractérisée par des dépôts marins du Crétacé supérieur à l'Eocène, de plateforme et de bassin, suivis de dépôts évaporitiques puis continentaux à l'Oligocène. Des nouvelles données de terrain récoltées dans la région du Gürlevik Dağı mettent en évidence une série ultramafique bien préservée qui montre depuis la base : (1) des péridotites partiellement serpentinisées et veinées de chrysotiles, localement intrudées de méta-gabbros, (2) des péridotites fortement serpentinisées affectées par une déformation cataclastique, associée à des ophicalcites ; enfin, (3) des dépôts en discordance de radiolarites et de brèches de remaniement à clastes mantelliques.

Cette séquence ultramafique a été interprétée comme étant une transition océan-continent de pied de marge, caractérisée par l'exhumation d'un manteau sous-continentale le long d'un détachement. Les péridotites serpentinisées et les ophicalcites témoignent de la phase finale du rifting lorsque le manteau affleure en domaine océanique, remanié dans les brèches. L'âge de fonctionnement du détachement est contraint par les datations des radiolarites, ainsi que par la géochronologie U-Pb réalisée sur les zircons des gabbros échantillonnées.

### 3.7.17 (o) L'obduction en Anatolie - Petit Caucase : un exemple extrême de transport de Lithosphère océanique, quelles causes ?

Marc Hässig<sup>1</sup>, Yann Rolland<sup>1</sup>, Marc Sosson<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

Les ophiolites du Petit Caucase et de NE Anatolie correspondent à un exemple extrême d'obduction puisqu'on constate un transport de fragments de Lithosphère océanique sur plusieurs centaines de kilomètres, à l'échelle de l'ensemble d'une bordure tectonique (>1000 km) vers 90 Ma. En adoptant une stratégie pluridisciplinaire lors de l'étude des ophiolites, nous avons pu préciser l'évolution de la fermeture de la Téthys et en conséquence l'obduction de ces dernières, tels que :

- L'existence d'un domaine océanique continu d'est en ouest séparant l'Eurasie (au nord) de l'ensemble bloc continental sud-arménien-plateforme Taurides-Anatolides (au sud), en subduction sous l'Eurasie.
- La genèse d'un domaine océanique dans contexte de supra-subduction à arrière-arc par ouverture lente, attribué à la formation de ces ophiolites, entre le Jurassique inférieur et Crétacé inférieur (c.180-150 Ma).
- L'obduction quasi simultanée de ces ensembles ophiolitiques, tout au long de la suture d'Izmir-Ankara-Erzincan et Sevan-Akera au Turonien-Coniacien-Santonien (c. 94-85 Ma).

- Un métamorphisme d'unités à la base de ces ophiolites (la semelle ophiolitique) permettant de contraindre leur dynamique de mise en place.

Ces données suggèrent fortement une mise en place commune de l'ensemble de ces corps ophiolitiques de la région d'étude sous la forme d'une nappe, dont l'épaisseur actuelle est très réduite (quelques kilomètres tout au plus). Ceci en ferait l'une des plus grandes nappes ophiolitiques obduites du globe (à l'affleurement dans une chaîne).

La modélisation numérique a validé l'hypothèse que la mise en place de cette nappe s'est faite grâce à des conditions thermiques particulières. Elle suggère que la mise en place d'ophiolites vieilles nécessite un état thermique de la lithosphère océanique proche de celui d'une lithosphère jeune (0-40 Ma). Un tel état thermique est suggéré pour les ophiolites du Caucase par la mise en place de laves alcalines sur l'ophiolite avant son obduction sous forme de monts sous-marins et/ou de plateau océanique au Crétacé inférieur. D'autre part, les monts et plateaux volcaniques sous-marins bloquant la subduction sous l'Eurasie expliquent également la quiescence du volcanisme sur cette marge, et le contexte de forçage tectonique conduisant à l'obduction simultanée sur le bloc arménien-anatolien et sur l'Arabie.

### 3.7.18 (p) Etude des enclaves associées aux granitoïdes du nord-ouest de Annaba, Algérie

Menana Daif<sup>1</sup>, Soraya Hadjzobir<sup>1</sup>, Abderrahman Toubal<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LGRN, Université de Annaba, Algérie

Au Nord Ouest de Annaba, entre Chetaïbi et le Cap de Fer, affleure une suite magmatique néogène intrusive dans des formations crétacées et accompagnée de miocène. C'est un complexe de roches plutoniques, volcaniques et de subsurface.

La série plutonique comprend, en plus d'un ensemble dioritique, des microgranites sous forme massive ou pyroclastique. Ces roches, facilement reconnaissables sur le terrain, ont une paragenèse assez constante et essentiellement composée de quartz, plagioclases, feldspaths potassiques et biotite.

L'appartenance de ces granitoïdes à une série calco-alcaline est facilement déductible d'un grand nombre de caractères pétrographiques et géochimiques. Les teneurs élevées en K<sub>2</sub>O, basses en FeO<sub>t</sub>, de même que le comportement de certains éléments en trace tel que Rb d'un côté, Ni et Cr de l'autre, contribuent à la spécificité de ces formations. La distribution des terres rares montre un bon fractionnement en LREE, une anomalie négative en Eu et un manque d'enrichissement en HREE. Les rapports isotopiques du strontium <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr varient entre 0.717 et 0.719.

Les granitoïdes renferment, en plus des xénolites sédimentaires et métamorphiques, des enclaves de nature magmatique plus ou moins riches en quartz mais toujours moins différenciées que la roche hôte. L'objet de cette contribution est une étude détaillée (pétrographie, chimie des majeurs, traces et terres rares) de ces enclaves ainsi qu'une comparaison avec la roche hôte. C'est aussi un apport supplémentaire pour la compréhension de la genèse des granitoïdes calco-alcalins.

### 3.7.19 (p) The fate of sulfur during fluid-present melting of subducting basaltic crust at variable oxygen fugacity

Sébastien Jégo<sup>1,2</sup>, Rajdeep Dasgupta<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>Rice University, Houston, États-Unis

To constrain the effect of redox state on sulfur (S) transport from subducting crust to mantle wedge during fluid-present melting and the stability of S-bearing phases in the downgoing ocean crust, we report high pressure phase equilibria experiments on a H<sub>2</sub>O-saturated MORB with 1 wt.% S at variable oxygen fugacity (fO<sub>2</sub>). Double capsule experiments were conducted at 2-3 GPa and 950-1050 °C, using various external fO<sub>2</sub> buffers. All experiments were fluid-saturated and produced either pyrrhotite- or anhydrite-saturated assemblages. Sulfur content at sulfide saturation (SCSS) or sulfate saturation (SCAS) of experimental hydrous partial melts was measured using electron microprobe. At pyrrhotite saturation (fO<sub>2</sub> ≤ FMQ+1.1), SCSS ranges from ~30 to ~500 ppm S, whereas at anhydrite saturation (fO<sub>2</sub> ≥ FMQ+2.5) SCAS ranges from ~700 ppm S up to 0.3 wt.% S. Mass-balance calculations suggest that the aqueous fluid phase may contain as much as ~15 wt.% S at 1050 °C at pyrrhotite saturation and up to 8 wt.% S at anhydrite saturation. Our data also show that DS<sub>fluid/melt</sub> decreases markedly with increasing fO<sub>2</sub> at pyrrhotite saturation, owing to the increase of melt S content. At anhydrite saturation, DS<sub>fluid/melt</sub> is very low (<100) but increases with decreasing temperature. The present study suggests that slab partial melts, either saturated with pyrrhotite or anhydrite, have very limited power to enrich the mantle wedge in S. Importantly, slab-derived aqueous fluids appear to be efficient vectors for the transport of S from slab to mantle wedge at all fO<sub>2</sub>. Therefore, S transfer from ocean crust to wedge mantle could take place over a range of fO<sub>2</sub> conditions, and oxidized slab conditions are not necessarily required to enrich the mantle wedge in S. Finally, depending on the initial amount of S in the slab, the proportion of residual anhydrite and pyrrhotite in the dehydrated slab below the region of formation of arc magmas is likely to be significant and may efficiently be recycled into the deep mantle.

### 3.7.20 (p) L'obduction en Anatolie - Petit Caucase : un transport de Lithosphère océanique vieille (80 Ma), évidences géologiques et apports de la modélisation numérique

Marc Hässig<sup>1</sup>, Thibault Duret<sup>2</sup>, Yann Rolland<sup>1</sup>, Marc Sosson<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>2</sup>Institut des Sciences de la Terre, Université de Lausanne, Suisse

Les ophiolites du Petit Caucase et de NE Anatolie correspondent à un exemple extrême d'obduction avec un transport de Lithosphère océanique datée du Jurassique moyen (c. 175 ~ 165 Ma) sur plusieurs centaines de kilomètres, à l'échelle de l'ensemble d'une bordure tectonique (>1000 km) vers 90 Ma. L'ensemble des données géologiques obtenues plaide pour l'obduction d'une Lithosphère vieille de 80 Ma environ au moment de l'obduction. L'âge de celle-ci est contraint à 90 Ma à la fois par l'âge de minéraux métamorphique dans la « semelle » d'obduction et par des âges paléontologiques sous et sur les ophiolites obduites.

(1) La croûte océanique a été réchauffée juste avant l'obduction par un magmatisme de point chaud/plateau océanique à échelle régionale.

(2) Les ophiolites forment une nappe dont l'épaisseur actuelle est très réduite (quelques kilomètres tout au plus).

(3) On n'observe pas d'éclogitisation de la croûte continentale sous-charriée. Des amphibolites à grenat retrouvées dans le mélange tectonique sous l'ophiolite (« semelle ») montrent des chemins PT-t compatibles avec un enfouissement sous 15 km de Lithosphère océanique.

La modélisation numérique a validé l'hypothèse que la mise en place de cette nappe s'est faite grâce à des conditions thermiques particulières. Elle suggère que la mise en place d'ophiolites vieilles nécessite un état thermique de la lithosphère océanique proche de celui d'une lithosphère jeune (0-40 Ma). Un tel état thermique est suggéré pour les ophiolites du Caucase par la mise en place de laves alcalines sur l'ophiolite avant

son obduction sous forme de monts sous-marins et/ou de plateau océanique au Crétacé inférieur. D'autre part, les monts et plateaux volcaniques sous-marins bloquant la subduction sous l'Eurasie expliquent également la quiescence du volcanisme sur cette marge, et le contexte de forçage tectonique conduisant à l'obduction simultanée sur le bloc arménien-anatolien et sur l'Arabie. La reprise de cette subduction nord suite au blocage de l'obduction aurait conduit à l'amincissement de la lithosphère océanique obduite, puis à l'exhumation dans un contexte extensif (type core-complex) de la croûte continentale sous-jacente.

### 3.7.21 (p) Assessment of tracer volatile element transfer in a mafic crust of a subduction zone from alpine ophiolites

Kenneth Koga<sup>1</sup>, Fanny Cattani<sup>1</sup>, Christian Nicollet<sup>1</sup>, Baptiste Debret<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LMV, Clermont-Ferrand

Alpine ophiolites provide an analog material to study prograde evolutions of a subducting ocean lithosphere and its geochemical consequences. Many previous studies have investigated to various element depletions and estimated fluid composition released along a down going slab. This work focuses on the transfer of F, Cl, Li and B, from the time of the formation of mafic oceanic crust to the depth of eclogite facies where nearly all of H<sub>2</sub>O bearing minerals are decomposed. Specifically, we have focused on the amphibole compositions in mafic rocks from Chenaillet, Queyras, and Viso. Because we suspect that whole rock geochemical signature is an average representation of multiple metamorphic events, we have focused on the grain-scale microanalysis to characterize specific mineral reaction and the evolution of amphibole compositions in consequence. Major element compositions were determined by an electron microprobe. SIMS 1270 is used for F and Cl measurements, and SIMS 7f is used for B and Li. Our preliminary data shows that all, F, Cl, and B reduce their abundance with an increase of metamorphic grade, and as the amphiboles transform to their high pressure variety. We found that F incorporation into amphibole is a function of temperature with higher temperature amphiboles richer in F. We also detected very little signals from ilmenite and rutile. Approximately 5 to 10 times less F and Cl are found in titanite compared to paragenetic amphibole. Phengite can be a significant repository for F but not for Cl.

### 3.7.22 (p) Continuity of sutures zones on both sides of the Talas-Fergana fault : insights from the Chatkal range

Chloé Loury<sup>1</sup>, Yann Rolland<sup>1</sup>, Stéphane Guillot<sup>2</sup>, Bénédicte Cenki-Tok<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>2</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>3</sup>Géosciences Montpellier

The structuration of the Central Asia Orogenic Belt (CAOB) results from successive accretion of multiple continental micro-blocs and island arcs from the Proterozoic to the Paleozoic. Following this accretion history, the CAOB has been affected by Permian and early Mesozoic transcurrent tectonics. Consequently the previous suture zones have been reworked making the Paleozoic structuration tricky to understand. The Kyrgyz Tianshan is affected by the Talas-Ferghana fault (TFF), a 2000 km long intracontinental strike-slip fault. The continuity of Paleozoic sutures on both sides of this fault remains poorly constrained. To the east, the South Tianshan (STS) suture is relatively well known. It results from the collision of the Tarim craton with the Middle-Tianshan at c.a. 320 Ma following the south-dipping subduction of the STS Ocean. To the east of the TFF, this suture is documented 200 km more to the north, along the Chatkal range.

In Chatkal range, metamorphic structure and presence of arc volcanism suggest a north-dipping subduction. This range exhibits garnet-amphibolites formed by retrogression of eclogites. The geochemical composition of these metamorphic rocks is both alkaline and tholeiitic. Peak pressure conditions in the eclogite facies are of 18 kbar at 490°C, which is followed by isothermal decompression until  $P < 8$  kbar. An age of  $301 \pm 15$  Ma is obtained by LA-ICPMS U-Pb dating of metamorphic allanite in the core of epidote and garnet. These alkaline retrogressed eclogites are interpreted as OIB-type seamounts that were scrapped off the slab during a north-dipping subduction, and incorporated in the active margin along thrust contacts. The isothermal decompression reflects a hot geothermal gradient during exhumation in the magmatic arc. These results show that the suture zone in the Chatkal range does not represent the same suture as the one to the east of the TFF. Consequently, the nature of the TFF could be questioned : is it a late strike slip fault or is it a reactivated suture separating two distinct blocs ?

### 3.7.23 (p) Transition entre accréation tectonique et effondrement post-orogénique : Enregistrement métamorphique et structural des nappes du Laurion (Grèce)

Christophe Scheffer<sup>1</sup>, Olivier Vanderhaeghe<sup>1</sup>, Alexandre Tarantola<sup>1</sup>,  
 Léandre Ponthus<sup>2</sup>, Lydéric France<sup>3</sup>, Adonis Photiades<sup>4</sup>

<sup>1</sup>GeoRessources, Nancy

<sup>2</sup>GET, Toulouse

<sup>3</sup>CRPG, Nancy

<sup>4</sup>Institute of Geology & Mineral Exploration (IGME), Acharnae, Grèce

Les nappes du Laurion, font partie de la ceinture orogénique des Hellénides en bordure Ouest du complexe métamorphique Attico-Cycladique. La pile de nappes comprend, du haut vers le bas, des calcaires non-métamorphiques en contact tectonique avec des métasédiments (marbres et schistes) contenant des boudins de roches basiques. Une foliation  $S_0/n$  porte une linéation  $L_n$  d'orientation E-W et est associée à des plis isoclinaux syn-schisteux. La paragenèse métamorphique, typique du faciès Schistes Bleus, comprend des porphyroblastes de glaucophane dans une matrice à chlorite-phengite. Cette foliation est affectée par des plis isoclinaux  $P_{n+1}$  associés au développement d'une schistosité  $S_{n+1}$  peu pentée et d'une linéation minérale  $L_{n+1}$  de direction NNE-SSW. Au sommet de la pile de nappes, cette transposition est peu marquée et les interférences de plis  $P_n/P_{n+1}$  sont facilement identifiables dans le paysage et en lame mince. La transposition de la foliation  $S_0/n$  dans la schistosité  $S_{n+1}$  augmente avec le niveau structural et est accompagnée par la réorientation progressive des axes de plis  $P_n$  et de la linéation minérale dans la direction NNE-SSW. Cette transposition est également associée au développement d'une zone mylonitique à faible pendage particulièrement bien exprimée au sein des marbres et qui passe graduellement à une zone de cataclaste de quelques mètres d'épaisseur. La thermobarométrie effectuée sur les chlorites et les phengites indique un couple pression-température de 1.3 GPa, 450°C pour la schistosité  $S_0/n$  et de 0,8 GPa, 550°C pour la schistosité  $S_{n+1}$ .

Nous interprétons ces données comme l'enregistrement successif (i) d'une première phase d'accréation tectonique par exhumation syn-orogénique d'unités préalablement entraînées en subduction et (ii) d'une seconde phase caractérisée par un fort raccourcissement vertical après relaxation thermique de la croûte orogénique reflétant l'effondrement post-orogénique de la ceinture des Hellénides.

### 3.7.24 (p) Structural, petrological and microstructural studies of the (U)HP rocks of the Central Tianshan Palaeozoic accretionary belt (NW China)

Jérémie Soldner<sup>1,2</sup>, Emilien Oliot<sup>1</sup>, Karel Schulmann<sup>1,2</sup>, Pavla Štípská<sup>1,2</sup>, Bo Wang<sup>3</sup>, Hongsheng Liu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IPG Strasbourg

<sup>2</sup>Centre for Lithospheric Research, Prague, République tchèque

<sup>3</sup>State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering Nanjing University, Nanjing, Chine

The Tianshan orogenic belt is located in the south-western part of the Central Asian Orogenic Belt and extends for about 1500 km from east to west, bordering the Jungar basin to the north and the Tarim basement to the south in the Xinjiang province, NW China. It is considered to be formed by Palaeozoic polyphased accretion and amalgamation of continental fragments, accretionary prisms and magmatic arcs of various ages. The rocks forming the studied (U)HP late Carboniferous accretionary wedge underwent complex polymetamorphic and structural evolutions. A structural study shows the presence of eclogite facies relictual fabrics preserved in lenses surrounded by blueschist facies retrograde fabric. The latter is verticalized by late upright folds which are responsible for major >50% shortening of the whole accretionary system. Petrological analyses and thermodynamic modelling of metapelites, blueschists and eclogites were used to determine the P-T evolutions of the different lithologies forming the Tianshan accretionary prism. Retrogression in the stability field of glaucophane suggests shared exhumation history of all lithological components at exceptionally low P/T gradient. The microstructural and EBSD studies of eclogites reveal important variability in deformation microstructures in both fine-grained mylonitic and preserved porphyroclastic eclogites. EBSD study of clinopyroxene and amphibole were performed to constrain deformation mechanisms related both to subduction and exhumation histories. CPO patterns and SEM-based microstructural observations obtained from different eclogite microstructural types suggest that deformation of the basic rocks was mainly accommodated by dislocation creep under wet conditions. CPO variations of eclogites suggest strong strain partitioning and mechanical coupling related to subduction stage while homogeneous deformation of blueschists indicates matrix dominated channel flow during exhumation.

### 3.7.25 (p) Sheared mafic amphibolites at the base of the New Caledonia ophiolitic mantle : evidence for inherited ocean-floor structures ?

Mathieu Soret<sup>1</sup>, Philippe Agard<sup>1</sup>, Benoît Dubacq<sup>1</sup>, Alberto Vitale-Brovarone<sup>1</sup>, Patrick Monié<sup>2</sup>

<sup>1</sup>iSTeP, Paris

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier

Obduction, whereby fragments of dense, oceanic lithosphere (ophiolites) are thrust on top of light continental ones, remains a poorly understood geodynamic process, in particular with respect to its initiation, where most of our knowledge comes from the metamorphic soles welded to the base of ophiolites.

We report the existence of deformed and hydrated mafic dykes at the base of the New Caledonia ophiolite, cross-cutting harzburgites (Plum beach, SE of Noumea). These dykes appear as several dm thick bands of sheared mafic rocks showing highly deformed textures. They are embedded within strongly serpentized and little-deformed peridotites.

Large-scale shear bands (>100m long) show consistent deformation patterns and shear senses in favor of sinistral-reverse displacements. Gabbroic to noritic pods and veins are found with the amphibolites, all contain magmatic plagioclase and orthopyroxene rimmed by metamorphic pale green hornblende in varying proportions. Plagioclase-rich veinlets are locally present.

Petrological observations indicate complex and successive recrystallization stages, locally including olivine, with at least two generations of metamorphic hornblende followed by tremolite and phlogopite, and late stage talc-chlorite-serpentine. Whole rocks trace elements analysis show a small depletion in REE compared to N-MORB, high enrichments in LILE (Cs/Yb  $\sim$ 50) and large depletion in Nb and Ta (Nb/Yb  $\sim$ 0.2). Geothermometry indicates temperatures  $\sim$ 750  $\pm$  50°C, consistently with the crystallization of tremolite.

Such structures could originate from (1) slab-derived mafic melts intruding the base of the ophiolite sequence during early subduction stages, (2) mafic melts inherited from the oceanic opening history of the South Loyalty Basin, potentially deriving from a fault involved in the initiation of the subduction/obduction system.

### 3.8 Dynamique des orogènes

Cette session résulte de la fusion des deux sessions initialement proposées ci-dessous. *This session results from the merge of the two following sessions initially proposed.*

**Responsables :**

- Dominique Chardon (GET, Toulouse)  
dominique.chardon@get.obs-mip.fr
- Yoann Denèle (GET, Toulouse)  
yoann.denele@get.obs-mip.fr

**Résumé :**

Nous encourageons les études pluridisciplinaires des processus orogéniques à toutes les échelles de temps et d'espace permettant de lier la dynamique tridimensionnelle des chaînes à l'évolution de leurs conditions aux limites, leur état thermique ainsi qu'à leur comportement mécanique. La session vise à croiser les expériences acquises sur une variété d'exemples précambriens, paléozoïques et alpins ainsi que les résultats de modélisations lithosphériques. De manière non restrictive, seront traités l'évolution des processus orogéniques depuis l'Archéen, les bilans de masse dans les chaînes, le rôle de la subduction, le couplage avec le manteau et la signification de la sismicité. Plus généralement, pourront être abordés les processus à l'oeuvre dans la construction des chaînes (dynamique du prisme, croissance continentale) et les processus mis en jeu lors des stades thermiquement matures de l'orogénèse (fluage syn-convergence, effondrement, exhumation de la croûte orogénique et rôle de la fusion partielle).

### Tectonothermal evolution of the pre-Alpine massifs at the Pyrenees

**Responsables :**

- Pedro Castiñeiras (Departamento de Petrología y Geoquímica, Madrid) castigar@ucm.es
- Josep Maria Casas (Universitat de Barcelona) casas@ub.edu

**Abstract :**

The study of the pre-Alpine massifs of the Axial Zone of the Pyrenees have contributed to the development of the understanding in several areas of geological knowledge, such as igneous and metamorphic petrology, microtectonics and the geodynamic evolution of collisional orogens. The interest in the area has not decreased with time and nowadays there are several research groups studying different aspects of the geology of these massifs. Some of these aspects include refinement of the geochronology to ascertain the relationships between metamorphism and magmatism, detrital zircon and isotope geochemistry to get insight in the paleogeography of the materials that constitute the massifs, and their relationships with the surrounding areas, including the

Iberian Massif and other peri-Mediterranean massifs.

With this session, we expect communications from a broad spectrum of researchers focused on all aspects regarding the structuration of the pre-Alpine massifs, including metamorphic and igneous petrology, structural geology, paleogeography, whole-rock and isotope geochemistry and geochronology. The purpose of this session is to facilitate a meaningful debate and provide a more complete understanding of the fundamental processes that controlled the development of the pre-Alpine massifs in the Pyrenees.

### 3.8.1 *Keynote communication* : Orogenesis and metamorphism : state of the art and perspectives from the Western Alps and the French Massif Central

Jean-Marc Lardeaux<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

Since pioneering works of Suess (1875, 1904-1909), Bertrand (1894), Termier (1903), Franchi et al. (1908), Argand (1911), Heim (1919-1922), Demay (1931), Stille (1936) and summarized by the assertion of Bertrand « Chaque chaîne a ses gneiss », the spatial-temporal link between metamorphism and orogeny has been clearly established in both Alpine and Variscan belts. In this presentation, we review and discuss, in a synthetic historical way, the main results obtained on the metamorphic evolutions of both Western Alps and French Massif Central.

First, for the Western Alps we portray the progressive metamorphic evolution through time and space with the presentation of 5 metamorphic maps corresponding to critical orogenic periods, namely 85-65 Ma, 60-50 Ma, 48-40 Ma, 38-33 Ma and 30-20 Ma. Second, for the French Massif Central we present 6 metamorphic maps corresponding to critical orogenic periods, namely 430-400 Ma, 400-370 Ma, 370-360 Ma, 360-345 Ma, 340-325 Ma and 320-290 Ma.

In both orogenic systems, we emphasize the lack of temporal data on high-pressure metamorphic rocks as well as the uncertainties on the sizes of rock units that have recorded the same metamorphic history (i.e. coherent P-T-t/ deformation trajectories).

We discuss the role of subduction-driven metamorphism in ocean-derived protoliths and the conflicting models that account for the diachrony of continental subductions in the Western Alps, as well as the role of multiple subductions in orogeny and the metamorphic effects of continental collision in the French Massif Central.

Finally, we underline the main differences and similarities between the metamorphic evolutions of the western Alps and the French Massif Central.

### 3.8.2 (o) Quelques mécanismes orogéniques illustrés par la chaîne des Maghrébides

Dominique Frizon De Lamotte<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEC, Cergy Pontoise

La structure de la chaîne des Maghrébides (Tell, Rif) est apparemment très simple. On y décrit un empilement où l'on distingue de bas en haut : (1) des zones externes correspondant à la marge nord-africaine inversée, (2) une « zone des flyschs » associée à de rares témoins ophiolitiques et représentant l'ancien bassin profond (Téthys maghrébine) qui sépare l'Europe de l'Afrique et (3) des zones internes interprétées comme l'ancienne marge européenne de la Téthys maghrébine. Certaines caractéristiques de premier ordre restent néanmoins mal comprises et interrogent sur les mécanismes orogéniques à l'œuvre dans cette chaîne. Trois questions principales seront abordées :

Quel mécanisme de transfert permet d'expliquer que le métamorphisme alpin HP-BT soit exclusivement présent dans les zones internes, c'est-à-dire dans la plaque supérieure, alors qu'il trouve forcément son origine dans l'évolution de la plaque inférieure ?

Quelle est la signification du métamorphisme qui affecte certaines unités externes ? Est-il lié à la compression miocène ou à un amincissement crustal antérieur et dans ce cas de quel âge ?

Comment expliquer que les panneaux lithosphériques plongeants observés aux deux extrémités du système (Arcs de Gibraltar et Siculo-Calabrais) soient déconnectés des sutures océaniques et pourquoi l'histoire de ces panneaux semble contrôler les taux de déformation en surface ?

### 3.8.3 (o) 2.7 Ga heating event and P-T-T evolution of the southern marginal belt of the Limpopo belt, south Africa : consequences for neoproterozoic continental accretion

Gautier Nicoli<sup>1</sup>, Adrien Vézinet<sup>2</sup>, Jean-François Moyen<sup>2</sup>, Gary Stevens<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Stellenbosch University, Centre for Crustal Petrology, Department of Earth Sciences, Stellenbosch University, Afrique du Sud  
<sup>2</sup>LMV, Saint-Etienne

The Kaapvaal craton (KC) in South Africa is bounded to the North by the Southern Marginal Zone (SMZ) of the Limpopo belt, which has been regarded as the reworked equivalent of the Kaapvaal craton basement, consisting of TTG granitoid gneisses (Baviaanskloof gneiss) and infolded metasediments (Bandelierkop formation) both of which were metamorphosed and deformed during ~2.7 Ga orogeny. Metamorphic and geochronologic data collected in metapelites, demonstrates that sediments from the SMZ underwent a very fast (~40Ma) clockwise P-T-t loop at ca. 2.7Ga, with burial rate of (0.17 to >4cm/y) to achieve peak metamorphic conditions at 2713±8 Ma.

Phase equilibria modeling constrains peak conditions to 845±15°C and 10.8±1.6 kbar. This was followed by isothermal decompression to 805±10°C and 6.6±0.63kbar, with subsequent isobaric cooling to amphibolite facies conditions, below 610°C, prior to 2680±6 Ma. This evidence argues strongly that the SMZ contains sediments deposited in an active margin during convergence, and that the metapelites were metamorphosed and underwent anatexis as a consequence of continental collision along the northern margin of the KC at ~2.7 Ga.

Several simultaneous high-temperature geological events occurred in the KC at this time : (1) widespread Ventersdorp Supergroup mafic to intermediate volcanism ; (2) local plutonic activity both north and south (Swaziland) of the edges of the KC (2670-2680Ma) with mantle component signature ; (3) granulite-facies metamorphism in Swaziland at ~2.7 Ga due to crustal thinning. Collectively, the data demonstrate that at ~2.7 Ga, the portions of the lower and mid-crust of the KC, underwent a significant heating event. The combination of information from these different rocks has the potential to provide detailed information on neo-Archaeon orogenic style.

### 3.8.4 (o) Imaging late-collisional slab retreat in the Variscan Eastern French Massif Central : a coupled U-Pb and Lu-Hf isotope study of granites and high-K mafic intrusives

Simon Couzinié<sup>1</sup>, Oscar Laurent<sup>1</sup>, Jean-François Moyen<sup>1</sup>, Armin Zeh<sup>2</sup>, Olivier Vanderhaeghe<sup>3</sup>, Véronique Gardien<sup>4</sup>, Adrien Vézinet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LMV, Saint-Etienne

<sup>2</sup>J.W. Goethe Universität, Institut für Geowissenschaften, Frankfurt, Allemagne

<sup>3</sup>GeoResources, Nancy

<sup>4</sup>LGLTPE, Lyon

The Variscan nappe pile of the Eastern French Massif Central was built up during the Devonian and Carboniferous as a result of subduction and subsequent collision between Gondwana and Laurussia. During the late-to post-collisional stage associated with orogen collapse (330-290 Ma), the nappe pile was intruded by numerous granite plutons and reworked by the rise of a migmatite-granite dome, the Velay complex.

Granites in the area belong to two main suites, namely : (i) peraluminous two-micas or cordierite-bearing leuco- and monzogranites (MPG

and CPG) and (ii) metaluminous, sub-alkaline granites and granodiorites (KCG) often associated with Mg-K-rich mafic intrusives of enriched mantle origin (locally referred to as vaugnerites). In order to (i) constrain the spatial and temporal framework of crust- and mantle-derived magmatism and (ii) understand its geodynamic setting, we conducted a coupled U-Pb and Lu-Hf study on zircon from 30 granites and vaugnerites. Both systematics were measured in situ by LA-(MC-)ICPMS. This new dataset shows that : (i) ages of both granites and vaugnerites range between 340 and 300 Ma ; (ii) in a given geographic area, granites and vaugnerites are roughly coeval which suggest that mantle magmas played a role in triggering anatexis through heat diffusion and advection ; (iii) age data show a two-stage sequence, first characterized by a southwards migration followed by a limited melting event at 305-300 Ma ; (iv) zircon inheritance and Hf isotope compositions of both granites and vaugnerites are strikingly similar and point to the involvement of older crust in magma genesis, especially of « Cadomian » age (500-660 Ma), either as the source itself (in the case of granites) or as enriched material that interacted with the mantle (in the case of vaugnerites).

The observed ages and Hf isotope compositions comply with the progressive southwards retreat of the Eo-Variscan slab proposed by Vanderhaeghe et al. (this conference). Such an event would have caused uplift of hot asthenospheric material, triggering partial melting of (i) lithospheric mantle remnants or tectonic mélanges of subducted crust and mantle slices (producing vaugneritic magmas) and (ii) the overlying crust (generating anatectic granites and ultimately giving rise to the Veilay complex).

### 3.8.5 (o) Eclogite metamorphism and exhumation in the Montagne Noire gneiss dome

Donna Whitney<sup>1</sup>, Christian Teyssier<sup>1</sup>, Patrice Rey<sup>2</sup>, Françoise Roger<sup>3</sup>,  
 Jean-Patrick Respaut<sup>3</sup>

<sup>1</sup>University of Minnesota, États-Unis

<sup>2</sup>Sydney University, EarthByte, Australie

<sup>3</sup>Géosciences Montpellier

Gneiss domes are common in most orogens and typically contain high-P (> 1 GPa) mafic rocks as inclusions in quartzofeldspathic gneiss that was emplaced at high-temperature/low-pressure conditions (< 2-9 km). Possibilities for eclogite-gneiss relationships include (1) high-P (eclogite facies) metamorphism occurred during an earlier (possibly unrelated) orogenic event, or (2) high-P metamorphism and high-grade metamorphism/crustal melting of the gneiss are associated in space and time. In either case, HP rocks are exhumed during ascent of the weak (likely partially molten) crust. These scenarios can be distinguished with high-precision geochronology to date HP metamorphism and gneiss/migmatite crystallization, with evaluation of P-T path and deformation history of eclogite and gneiss.

In the Montagne Noire dome of the southern Massif Central, rare metabasaltic eclogite occurs as lenses in quartzofeldspathic gneiss. Previous P estimates for the eclogite-facies rocks range from 0.9-1.4 GPa (Demange 1985 ; Franke et al. 2011). In some localities, eclogite is extensively retrogressed to amphibole-plagioclase symplectite. South of La Salvetat-sur-Agout, relatively fresh eclogite containing garnet + omphacite + rutile occurs. Garnet is zoned (from core to rim : Mg increase, Ca decrease), and typically contains an inclusion-rich core (with faceted quartz, apatite, rutile) and inclusion-free rim. Zircon occurs as inclusions in garnet and in the matrix ; U-Pb analysis of zircon is in progress. 2D numerical models for the formation of gneiss domes under extension predict that channels of partially molten crust converge in the deep crust beneath a zone of localized extension, driving ascent of hot, low-viscosity crust and creating a « double dome ». The Montagne Noire gneiss dome has a double-dome structure comprised of the Espinouse

and Caroux subdomes. The studied eclogite is located in the proposed zone of maximum exhumation between the two subdomes.

### 3.8.6 Keynote communication : The dynamics of partially molten crust : natural examples and numerical models

Christian Teyssier<sup>1</sup>, Patrice Rey<sup>2</sup>, Donna Whitney<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Minnesota, États-Unis

<sup>2</sup>Sydney University, EarthByte, Australie

Orogens start as cold domains of the shallow Earth (low geotherm), and then most warm up over time (high-T metamorphism, partial melting) because (1) continental crust, whether thickened or subducted, heats up owing to conduction and enhanced heat production, and (2) upward transfer of convecting mantle during slab breakoff, slab rollback, or mantle delamination provides a heat source beneath the orogen. As a result, orogens become weak and collapse. Orogenic collapse begins during mountain building and convergence (Tibet today) and dominates the latest stages of tectonic activity in extensional/ transtensional systems (i.e. North American Cordillera, Aegean domain). A major contributor to orogenic collapse is the partially molten lower crust. Formerly partially molten crust is commonly exposed in metamorphic core complexes that are bounded by extensional detachments and cored by migmatite domes. Thermal and mechanical numerical modeling evaluates quantitatively the processes and timescales of dome development. During steady extension of a layered crust, upper-crust extension is dynamically linked to deep crustal flow until much of the lower crust material is drained or until boundary conditions change. The layer of partially molten crust is mobile and opportunistic. Low-viscosity material within this layer flows laterally in response to variations in crustal thickness or density distributions, for example from a plateau to a foreland region. Partially molten crust also rises to fill gaps that open in the upper crust (such as by faulting or localized intense erosion) and transfers mass and heat from deep to shallow levels. This vertical flow is rapid (a few m.y.), produces migmatite domes, and contributes to stabilizing the orogenic crust. In the North American Cordillera, results of low-T thermochronology indicate that migmatite rocks were emplaced at shallow (< 2 km) levels during the collapse instability and are still preserved, 45 million years later, on the mountain peaks.

### 3.8.7 (o) A tale of two viscosities : the case of partial melting

Anne-Céline Ganzhorn<sup>1</sup>, Gema Llaurens<sup>2</sup>, Enrique Gomez-Rivas<sup>2</sup>,  
 Jens Roessinger<sup>2</sup>, Loïc Labrousse<sup>1</sup>, Paul Bons<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>Department of Geosciences, Eberhard Karls, University of Tübingen, Allemagne

From experimental study, partial melting is inferred to be a weakening process active during orogeny. However extrapolation to natural conditions is not trivial and need to be more intensively studied. In this perspective, numerical simulations appear as a good method to fill the gap between experimental and natural conditions.

We describe here a series of two-dimensional simple shear numerical experiments on linear viscous two phase material performed at the grain scale. One phase is designed to be a high viscosity phase (HVP) while the other represents a low viscosity phase (LVP), i.e. a melt. The viscosity contrast ( $m$ ), the relative abundance of each phase ( $\Phi$ ), the wetting angle of the LVP ( $\omega$ ) and the grain boundary migration (GBM) velocity were systematically varied to test the effect of those parameters on textures and flow behaviour of the whole system.

Increasing  $m$  up to a certain threshold has no effect on the microstructure and on the mechanical behaviour. Aggregate viscosity is similar to the solid viscosity up to 15% LVP and starts to deviate at higher  $\phi$ . Wetting angle and GBM velocity have complex interferences. At  $\omega = 30$  and fast grain boundary migration, melt pockets become connected and elongated perpendicular to shear direction whereas they are oblique to the shear direction when grain boundary migration remains slow.

When combined to fast grain boundary migration,  $\omega = 180^\circ$  yield LVP pockets staying spherical whereas they become elliptic for slow grain boundary migration.

In numerical experiments without grain boundary migration, the system is subject first to a hardening phase followed by softening before steady state is reached. By contrary the mechanical behaviour of the system depends on the wetting angle, when grain boundary migration occurs. At low  $\omega$ , the system is subject to softening whereas at high  $\omega$  it is subject to hardening as the melt pockets remain unconnected. Differences in mechanical behaviour of the aggregate are linked to microstructure evolution.

To sum up, our numerical simulation of a two phase aggregate during simple shear deformation show competition between deformation and GBM driven by surface tension effects. Adding other mechanisms to this parameter study such as grain boundary sliding should help linking textures and mechanical behaviors of aggregates.

### 3.8.8 (o) La fusion partielle : un rôle prépondérant à Ultra-Haute Pression

Loïc Labrousse<sup>1</sup>, Thibault Duretz<sup>2</sup>, Anne-Céline Ganzhorn<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>Institut des Sciences de la Terre, Université de Lausanne, Suisse

La fusion partielle est considérée comme un processus affaiblissant dans l'histoire tardi-orogénique des chaînes de montagnes. De nouvelles évidences de terrain et l'analyse des chemins pression-température des grands domaines d'Ultra-Haute Pression (UHP) montrent que l'anatexie est en fait possible dès les stades précoces de l'implication d'une lithosphère continentale dans une zone de convergence, lors de la subduction continentale. Nous testons ici cette hypothèse à travers une série d'expériences numériques basées sur la géométrie des Calédonides Scandinaves. La prise en compte des effets de viscosité de la fusion partielle et l'implémentation de différentes réactions de fusion partielle (fusion hydratée vs fusion-déshydratation) montrent que la fusion à basse température favorise l'exhumation syn-orogénique de matériau crustal, alors que les fusions à plus haute température favorisent le sous-plaquage des matériaux dans la plaque supérieure. La géométrie des isothermes dans le prisme, et donc la forme des chemins PT des portions exhumées, sont aussi affectées par la fusion partielle. En effet, la chaleur latente de fusion partielle change les propriétés thermiques des roches, et modifie leur bilan thermique. La fusion partielle semble donc un être un processus de premier ordre même dans les orogènes « froids ».

### 3.8.9 (o) Développement in-situ d'un dôme migmatitique (Dôme de Vaasa, Svécofennides, Finlande)

Francis Chopin<sup>1</sup>, Annakaisa Korja<sup>1</sup>, Pentti Hölttä<sup>2</sup>, Olav Eklund<sup>3</sup>, Osmo Tapani Rämö<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Helsinki, Department of Geosciences and Geography, Finlande

<sup>2</sup>Geological Survey of Finland, Espoo, Finlande

<sup>3</sup>Åbo Akademi University, Turku, Finlande

Dans les Svécofennides, le dôme migmatitique géant de Vaasa (>150 km de diamètre) est né de l'anatexie partielle et progressive d'un bassin sédimentaire paléoprotozoïque. Son étude permet de contraindre les processus orogéniques de transferts de matière et de chaleur dans les orogènes chauds précambriens. Le dôme ne présente pas une architecture typique avec foliations et linéations concentriques. En effet, l'étude structurale met en évidence un épaississement du bassin formant une foliation plate suivi par la formation des plis droits et de cisaillements verticaux localisés en bordure du dôme et au sein des diatexités délimitant son cœur. L'ensemble de ces trois phases est associé sur le terrain à la production de liquide silicaté. Aucun mouvement tardif associé à des structures plates et concentriques n'a pu être observé. Ni l'étalement latéral ni l'extension post-orogénique n'expliquent son architecture. La structure en dôme se matérialise par un fort gradient du pic métamorphique du faciès amphibolite jusqu'à l'anatexie, de la bordure vers le cœur du dôme. La modélisation pétrologique (Perple\_X) suggère une augmentation de 500 à plus de 800 °C à une pression constante de 4,5-5 kbar, donc sans exhumation différentielle. De nouvelles datations U/Pb associées à la compilation des données géochronologiques existantes suggère un pic de déformation et de fusion partielle à 1875 Ma, et un refroidissement global du dôme à environ 1860-1865 Ma dans un environnement métamorphique estimé à 450 °C et 3 Kbar. Le dôme de Vaasa reflète la fusion partielle d'un bassin sédimentaire lors de son accrétion au-dessus d'un front thermique dont l'origine (sous-placage de magma dans la croûte inférieure ? délamination de la lithosphère ? maturation thermique ? ...) reste pour le moment discutée. N'ayant pas les caractéristiques classiques des dômes structuraux, le dôme de Vaasa pourrait être un parfait exemple de dôme migmatitique formé in-situ par anatexie.

### 3.8.10 (o) Le dôme gneissique néoprotozoïque de Mirbat (Sultanat d'Oman) : déformation, évolution thermique et modèle de formation

Damien Roques<sup>1</sup>, Yoann Denèle<sup>1</sup>, Jérôme Ganne<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

Les dômes gneissiques sont des objets communs qui traduisent des transferts verticaux dans les orogènes. Il n'existe pas de consensus pour interpréter ces objets car le jeu de données disponible est encore trop parcellaire. Le modèle de formation communément admis qui considère un amincissement tardi-orogénique d'échelle crustal n'est pas forcément applicable à tous les dômes. Pourtant, la compréhension de la formation de ces objets a de nombreuses implications sur notre conception des orogènes.

Le dôme de Mirbat présente l'avantage de fournir des affleurements de qualité et continus sur une superficie de 1000 km<sup>2</sup>. Il est constitué d'un cœur de paragneiss migmatitiques et d'une enveloppe d'orthogneiss. L'étude structurale montre un demi-dôme allongé suivant à N230° et présentant une asymétrie avec un flanc sud redressé et un flanc nord faiblement penté. Les linéations du flanc sud sont orientées autour de N130° et associées à des cisaillements vers le SE alors que celles du flanc nord sont réglées à N320° et associées à des cisaillements vers le NW. A l'ouest du dôme les orthogneiss de l'enveloppe montrent des foliations à pendage modéré vers l'ouest, des linéations EW et des cisaillements vers l'E. Le dôme est recoupé à l'est par un pluton associé à un point triple asymétrique. L'étude métamorphique montre un pic dans les paragneiss à 660°C-8 kbar et un chemin rétrograde dans le faciès schiste vert.

Nous proposons un modèle d'exhumation du dôme au niveau de deux zones de cisaillement avec localisation progressive de la déformation sur la zone nord, dans une croûte subissant un fluage horizontal vers

l'est. La croûte est ensuite affectée par une tectonique décrochante synchrone de la mise en place du pluton. Les données actuelles permettent de considérer la formation du dôme de Mirbat dans un contexte d'extension syn-convergence, et non pas au cours d'un amincissement tardi-orogénique. De nouvelles analyses permettront de tester et quantifier ce modèle de formation.

### 3.8.11 *Keynote communication* : Flow of the partially molten Variscan orogenic crust from syn-orogenic exhumation of subducted continental crust to gravitational collapse along a convergent plate boundary marked by slab retreat

Olivier Vanderhaeghe<sup>1</sup>, Véronique Gardien<sup>2</sup>, Jean-François Moyen<sup>3</sup>, Oscar Laurent<sup>4</sup>, Simon Couzinié<sup>5</sup>, Aude Gébelin<sup>6</sup>, Arnaud Villaros<sup>7</sup>, Maryse Ohnenstetter<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GéoRessources, Nancy

<sup>2</sup>LGLTPE, Lyon

<sup>3</sup>LMV, Saint-Etienne

<sup>4</sup>J.W. Goethe Universität, Institut für Geowissenschaften, Frankfurt, Allemagne

<sup>5</sup>École normale supérieure de Lyon

<sup>6</sup>Biodiversität und Klim-Forschungszentrum, Frankfurt-am-Main, Allemagne

<sup>7</sup>ISTO, Orléans

The Variscan belt of Western Europe exposed in the French Massif Central is a perfect example of a collision zone characterized by protracted syntectonic magmatism and partial melting (from 380 to 280 Ma) with a wide range of petrologic and geochemical signatures (calc-alkaline, high-K, Mg-K, peraluminous) that have been inferred to fingerprint lithospheric subduction, mantle upwelling and/or partial melting of the orogenic wedge.

The nappe pile encompasses an upper gneiss unit (UGU) and a lower gneiss unit (LGU) that are separated by an association of mafic-ultramafic rocks designated as the Leptynite-Amphibolite Group (LAG) and has been interpreted as representing remnants of former small immature oceanic basins. Both the UGU and the LGU are made of migmatites but are distinguished on the basis of their structural position with respect to the LAG and of their metamorphic record. The UGU has preserved relics of high-pressure metamorphism whereas the LGU has only recorded a high-temperature metamorphism.

We present a synthesis of structural, petrologic, geochemical and geochronological data from the various lithologic-tectonic units exposed along a transect across the Variscan belt of Western Europe from the French Massif Central to the Pyrenees. In particular, the new geochronological and geochemical dataset presented by Couzinié et al. (this conference) suggests the contribution of mantle and crustal derived magmas with a southward younging of syntectonic emplacement. These data provide a basis to elaborate a model for the structure of the Laurussia-Gondwana plate boundary at the onset of convergence and for the generation and flow of migmatites during orogenic evolution from the early stage of subduction of the continental crust to gravitational collapse of the orogenic belt in a context of a convergent plate boundary marked by southward slab retreat.

### 3.8.12 (o) Chronology, petrogenesis and heat sources for successive Carboniferous magmatic events in the southern-central Variscan Vosges Mts. (NE France)

Anne-Sophie Tabaud<sup>1,2</sup>, Vojtech Janoušek<sup>3</sup>, Etienne Skrzypek<sup>2,4,5</sup>, Karel Schulmann<sup>2,3</sup>, Philippe Rossi<sup>6</sup>, Hubert Whitechurch<sup>2</sup>, Catherine Guerrot<sup>7</sup>, Jean-Louis Paquette<sup>8</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Chrono-environnement, Besançon

<sup>2</sup>IPG Strasbourg

<sup>3</sup>Centre for Lithospheric Research, Prague, République tchèque

<sup>4</sup>Kyoto University, Department of Geology and Mineralogy, Kyoto, Japon

<sup>5</sup>Institute of Geological Sciences, University of Wrocław Institute of Geological Sciences, University of Wrocław, Pl. M. Borna 9, 50-205 Wrocław, Poland - Pologne

<sup>6</sup>Commission de la Carte Géologique du Monde, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Paris

<sup>7</sup>BRGM, Orléans

<sup>8</sup>LMV, Clermont-Ferrand

Plutonic bodies of the Central and Southern Vosges Mts. can be assigned to two major magmatic events : an Early Visean Mg-K (345-335 Ma) and c. 10-15 m.y. younger S-type (330-320 Ma). New petrological, geochemical and Sr-Nd isotopic data highlight the existence of two groups of Mg-K intrusions that might be related to the nature of their magma sources, e.g. CHUR-like and enriched mantle which interacted with juvenile and mature crustal material, respectively. The differences between these two groups are explained by a geodynamic scenario involving deep subduction and relamination of the Saxothuringian continental crust under the Moldanubian Continent. The relaminated radiogenic Saxothuringian material is thought to have been responsible for both dehydration melting of subducted crust and underlying metasomatised mantle thereby generating the Mg-K magma subsequently emplaced at middle crustal depth. During their ascent, the mafic magmas interacted with felsic melts of mutually comparable Sr-Nd isotopic composition. Significantly later (~10-15 m.y.) followed a widespread mid-crustal anatexis, generating voluminous granite intrusions from mixed crustal sources (paragneisses and/or immature felsic-intermediate metagneissous rocks). The principal heat source for such major melting event is related to the presence of Heat Producing Elements-rich Mg-K plutons which were responsible, after the time lag specified, for temperature increase at mid-crustal levels by in situ radiogenic heat production. The current work underlines the importance of deep continental crust subduction and relamination for the magmatism and development of collisional orogens.

### 3.8.13 (o) The rheological role of anatectic front within a mature orogenic crust : The case of the late Variscan Montagne Noire Axial Zone (MNAZ)

Mickaël Rabin<sup>1</sup>, Pierre Trap<sup>1</sup>, Nicolas Carry<sup>1</sup>, Kévin Fréville<sup>2</sup>, Bénédicte Cenki-Tok<sup>2</sup>, Cyril Lobjoie<sup>1</sup>, Philippe Goncalves<sup>1</sup>, Didier Marquer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Chrono-environnement, Montbéliard

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier

The Montagne Noire massif (French Massif Central) consists in a dome-shaped core (called MNAZ) composed of migmatites, gneisses and micaschists of Proterozoic to Ordovician age mantled by a Paleozoic upper crustal sequence composed by low-grade metamorphosed sedimentary

rocks. The MNAZ is a natural laboratory for studying the deformation mechanisms at different levels within the continental crust involved in the large and hot Variscan collision belt. However, the tectonic setting of the MNAZ is still highly disputed mainly due to a lack of coupled structural and quantified metamorphic analyses. In this contribution, a detailed field analysis combined with the global scale vision given by a geodataset allows to discuss the geometry and strain partitioning within the gneissic core. Three main deformation events named D1, D2 and D3 are documented. The D1 finite strain pattern due to the early crustal thickening is reworked by a NW-SE directed horizontal D2 shortening in a bulk dextral transpressive regime. The D3 deformation is localized on a 3km thick flat lying transition zone corresponding to the anatectic front and characterized by a ductile thinning in a bulk E-W trending extension. A metamorphic study was performed on garnet-cordierite-bearing partially molten metasedimentary rocks sampled along a N-S trending profile. Pseudosection calculations show a clockwise evolution with a peak temperature around  $6.5 \pm 0.5$  kbar and  $720 \pm 20^\circ\text{C}$ , followed by a near isothermal decompression down  $4 \pm 0.5$  kbar and  $665 \pm 20^\circ\text{C}$ . In this new P-T-d evolution, the D2 and D3 deformations were initiated at the peak of prograde metamorphism, overlapping in time and then inducing the exhumation of the deep gneissic core during near isothermal decompression metamorphism. Our structural and metamorphic results allow to discuss the tectono-thermal framework of the MNAZ gneiss dome and emphasize the role of the anatectic front as a main rheological transition during this late Variscan tectonics.

### 3.8.14 (o) A new approach to provenance studies using detrital metamorphic zircon : an example from migmatites in the Albera Massif (Eastern Pyrenees)

Pedro Castiñeiras<sup>1</sup>, Carmen María Aguilar Gil<sup>2</sup>, Marina Navidad<sup>1</sup>,  
 Montserrat Liesa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Petrología y Geoquímica, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Espagne*

<sup>2</sup>*Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Espagne*

Conventional detrital zircon studies, in which a random zircon population is selected and analyzed, are the most common. However, it is very frequent that zircon survives more than one complete sedimentary cycle, so that some ages represent recycled materials instead of direct sources. Furthermore, analyzing only magmatic areas brings along a bias in the obtained ages, and the loss of important tectonic information.

We have performed a qualitative detrital zircon study from two metapelitic granulite samples from the upper Neoproterozoic sequence in the eastern Pyrenees, selecting only metamorphic zircon, and analyzed their rims with a SHRIMP-RG instrument, obtaining not only isotopic data, but also compositional data of the zircon. We have also analyzed by laser ablation ICP-MS a random population of zircons for comparison.

In the last case, the results are comparable to other peri-Mediterranean studies, with the main age population corresponding to the Cadomian-Pan-African orogenies, abundant Mesoproterozoic ages, less common Paleoproterozoic ages, two peaks in both late and early Neoproterozoic limits and some Meso- and Paleoproterozoic grains. To obtain such age distribution, the Pyrenean massifs should have been located in the northern margin of Gondwana, closer to Sardinia than to Iberia, in front of the Arabian-Nubian shield. In the first case, the results were dominated by Mesoproterozoic ages. Compositional data confirmed the metamorphic character of the majority of those grain rims.

The preservation of metamorphic zircon in a detrital zircon population has important consequences in the interpretation of the source region. Metamorphic rims are usually less resistant to physical abrasion during

transport. The presence of these rims indicates that the zircon is not recycled material but it represents a primary and close source.

Using this qualitative approach (or a combination of methods) in detrital zircons studies in other areas will provide new and important information on the provenance of sediments that, in turn, will serve us to pinpoint the paleoposition of the strand of terranes in northern peri-Gondwana from the Neoproterozoic through the Paleozoic, until the closure of the Tethys Ocean.

### 3.8.15 (o) Structural, petrological and geochronological evolution of an orogenic wedge during the Variscan orogeny : An example from the Maures - Tanneron Massif (SE France)

Julie Schneider<sup>1</sup>, Michel Corsini<sup>1</sup>, Emilien Olliot<sup>2</sup>, Jérémie Melleton<sup>3</sup>,  
 Jean-Marc Lardeaux<sup>1</sup>, Muriel Gerbault<sup>1</sup>, Alexandre Reverso-Peila<sup>1</sup>,  
 Yann Rolland<sup>1</sup>, Véronique Gardien<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*GEOAZUR, Sophia Antipolis*

<sup>2</sup>*IPG Strasbourg*

<sup>3</sup>*BRGM, Orléans*

<sup>4</sup>*LGLTPE, Lyon*

A synthesis of structural, petrological and geochronological data for the Maures-Tanneron Massif and its integration in the framework of adjacent massifs (i.e. Sardinia and Corsica) allows us to propose a new model of evolution of the southern Variscan belt as follow : (i) Ordovician magmatic activity in the North Gondwanian margin, (ii) Siluro-Devonian subduction associated with HP/LT metamorphic conditions (c. 10-15°C/km) and calc-alkaline supra-subduction magmatism, (iii) Middle Devonian to Late Visean crustal nappes stacking associated with typical Barrovian metamorphism (c. 20-30°C/km), (iv) Middle Carboniferous back-thrusting associated to partial melting and crystallization of crustal peraluminous magmas and (v) Late Carboniferous transpressive regime characterized by folding and strike-slip shear zones associated with high temperature metamorphic conditions (up to c. 60-80°C/km) contemporaneous to late granitic intrusions and intramontane basin formation.

Contrary to previous models that considered the Grimaud strike-slip fault as the main tectonic suture, we describe the Maures-Tanneron Massif as an orogenic wedge encompassing two main tectono-metamorphic units coupled along a major thrust zone (the Cavalaire thrust) and subsequently back-folded : An Internal Zone with migmatites and syntectonic granitoids, where HP relicts have been exhumed, and an External Zone that escaped the late HT event and preserved previous structures.

We interpret the progressive increase of the thermal gradient in the internal part of the belt during nappes stacking and back-thrusting is interpreted as a consequence of gravitational instabilities triggered in the partially molten orogenic root. Continuous compressive forces applied to the belt allowed vertical extrusion of the orogenic root in fold-dome structures. Finally the mass transfer was accommodated by orogen-parallel transpressive shearing during the Late Carboniferous.

### 3.8.16 (p) Petro-structural evolution of the alpine External Crystalline Massifs : Implications for the Variscan orogenic evolution

Kévin Fréville<sup>1,2</sup>, Michel Faure<sup>1</sup>, Jérémie Melleton<sup>1,2</sup>, Pierre Trap<sup>3</sup>,  
 Olivier Blein<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*ISTO, Orléans*

<sup>2</sup>*BRGM, Orléans*

<sup>3</sup>*Laboratoire Chrono-environnement, Montbéliard*

The evolution of the Variscan orogen that develops from Iberia to Bohemia, through the Massif Armoricain and Massif Central is relatively well understood. In contrast, the East Variscan Branch, extending from Bohemia to the Mediterranean area, through the Alpine basement, remains poorly studied.

A detailed structural, kinematic and geochronological study of Alpine tectonics in the Belledonne and Oisans External Crystalline Massifs (Bellanger, 2013) allow us to « erase » the alpine reworking and to focus on Variscan tectono-metamorphic features.

The External Crystalline Massifs of Western Alps display a large variety of lithological and structural elements such as : Ordovician Chamrousse ophiolites, leptynite-amphibolite complexes, eclogites, HT/MP metamorphic rocks, bimodal volcano-clastic rocks, migmatites and several generations of granitoids. However, in spite of interesting attempts (e.g. Fernandez et al., 2002 ; Guillot et al., 2009 ; von Raumer et al., 2013, and enclosed references), the East Variscan Branch is not fully understood yet.

In order to improve the understanding of Variscan orogenic crust we performed an extensive structural analysis along an E-W cross section, from Belledonne to Oisans massifs. In addition, thermobarometric calculations using pseudosection approach, are made on metapelites and amphibolites. Furthermore, partial melting and granitoids emplacement are constrained in time by EPMA dating. Our results casts new insights on the ophiolitic nappe emplacement, polyphase deformation, and crustal melting. Here, emphasis is placed on the high temperature events characterized by abundant crustal melt products (migmatite, granite) coeval with a HT-MP deformation. Our thermo-barometric constraints and geochronological measurements of granitoids and migmatites formation allow us to discuss the tectonic and thermal evolution of this part of the East Variscan Branch.

### 3.8.17 (p) Revised « nappe » tectonics in the Southern French Massif Central : Orogen-parallel transtensional stretching during wildflysch sedimentation

Dominique Chardon<sup>1</sup>, Damien Roques<sup>1</sup>, Markus Aretz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

The Montagne Noire is a key area where interactions between the hinterland of the Variscan orogen and the Carboniferous flysch basin enclosed in the Ibero-armoricain syntax may be investigated. The massif consists in Paleozoic sediments wrapping a Late- to post-orogenic gneiss dome. The recumbent fold nappes identified on the southern flank of the dome have long been considered to originate north of the dome and emplaced by south-verging thrusting on the basis of stratification / cleavage relationships and southward facing of some of the large-scale recumbent folds.

Our work aims at reevaluating the kinematics and sedimentary environment of the lower part of the nappe pile including the flysch sediments on the basis of extensive structural mapping and kinematic analysis. We show that the strain and fold patterns at all scales result from WSW-directed shearing on a décollement that lately steepened as a result of dome amplification to record WSW dextral strike-slip. The kinematic framework of shearing and folding is consistent with progressive dextral transtension that was further achieved by oblique-slip on a detachment bounding the wildflysch basin to the North. This model resolves long-standing issues regarding the kinematic and paleogeographic history of the Montagne Noire. Indeed, there is no data supporting a northern origin for the nappes. Furthermore, the largest olistoliths derive neither from the nappes nor from the northern limb of the dome but instead show strong affinities with series from the Mouthoumet massif located further South. Kinematics of the Montagne Noire together with

observations in the Mouthoumet massif suggest that distributed dextral transtension in Southern France accommodated lateral stretching of the Variscan belt by achieving crustal movements into the bending Ibero-Armoricain syntax during Carboniferous wildflysch sedimentation.

### 3.8.18 (p) L'évolution tectonique et l'activité sismique de la Province de Grenville au SO du Québec : l'apport des données gravimétriques et aéromagnétiques

Grégory Dufréchoy<sup>1</sup>, Lyal Harris<sup>2</sup>, Louise Corriveau<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Institut National de la Recherche Scientifique - centre Eau Terre Environnement, Québec, Canada

<sup>3</sup>Natural Resources Canada / Geological Survey of Canada, Québec, Canada

L'orogène mésoprotérozoïque Grenvillien en Amérique du Nord est considéré comme la racine profonde d'un orogène de type Himalayen qui a connu une évolution géodynamique complexe avec plusieurs périodes orogéniques.

Les données de champ potentiel (gravimétrie et magnétisme) fournissent une information sur la structuration et la distribution des roches dans la croûte qui reste encore largement sous-exploitée. L'étude des données gravimétriques et aéromagnétiques régionales a permis l'identification de structures profondes et transverses à la direction générale de l'orogène. Ces structures ont été interprétées comme des failles paléoprotérozoïques localisées dans le socle archéen et résultant de deux phases de rifting Paléoprotérozoïque. Ces failles ont été réactivées au cours de la formation de l'orogène Grenvillien et ont joué un rôle important (i) sur la géométrie des nappes de charriage et des plis formés au cours de chevauchement, (ii) sur la réorientation des structures pré-existantes, et (iii) sur la formation de zones de cisaillement transverses. La Province de Grenville au SO du Québec offre un excellent exemple de partitionnement de la déformation avec des mécanismes de déformation distincts suivant le niveau crustal durant la réactivation de structures de socle. Des corridors de décrochement senestre de 10-20 km de large situés dans les nappes de charriage inférieures (15-30 km de profondeur) et un mégakink de 100 km de large ont été identifiés pour la première fois. L'activité sismique dans la Zone Sismique de l'Ouest du Québec pourrait résulter de la réactivation des nouvelles structures identifiées lors de cette étude.

### 3.8.19 (p) Lower Sebtides Neogene exhumation and uplift in Ceuta and Cabo Negro areas (Internal Rif, Northern Morocco) : insights from medium- and low-temperature thermochronology

Adrien Romagny<sup>1</sup>, Philippe Munch<sup>2</sup>, Marc Jolivet<sup>3</sup>, Michel Corsini<sup>1</sup>, Jean-Marc Lardeaux<sup>1</sup>, Bruno Scalabrino<sup>1</sup>, Michaël Bonno<sup>2</sup>, Ali Azdimousa<sup>4</sup>, Nicolas Arnaud<sup>2</sup>, Patrick Monié<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier

<sup>3</sup>Géosciences Rennes

<sup>4</sup>Laboratoire Géosciences Appliquées, Faculté des Sciences, Département de Géologie, Oujda, Maroc

The Rif Chain (Northern Morocco) belongs, with the Betic Cordillera (Southern Spain), to the western termination of the Alpine belt. Deepest units of the Rif Internal Zones (i.e. Lower Sebtides) outcrop in three

areas, from North to South : Ceuta, Cabo Negro and Beni Bousera. The quick exhumation of these units during the Late Oligocene-Early Miocene is related with a crustal thinning and the Alboran Sea rifting. Despite Beni Bousera massif has been well investigated, no data are available in Ceuta and Cabo Negro areas. This study aims to constrain the last steps of cooling and exhumation in the Lower Sebtides using medium- and low-temperature thermochronological data. Combination of Ar-Ar on micas, fission tracks and (U-Th)/He on apatites (respectively AFT and AHe) from high-grade rocks allows understanding thermal history between ~450-350°C and surface temperatures. These data suggest a similar cooling evolution of the Ceuta and Cabo Negro units. Ages obtained with all these methods are comprised in the same interval, between ~22 and 18 Ma. These data record an almost instantaneous cooling (between 50 and 200°C/Ma) associated to final exhumation after the Oligo-Miocene thermal event affecting these units at shallow depths (~10 km). Low-temperature data suggest that Ceuta and Cabo Negro units cooled at surface temperatures before Beni Bousera ones. Since the end of Burdigalian, the Rif internal zones vertical movements did not exceed 1km, even during the Messinian Salinity. AFT and AHe ages in the whole Sebtides are also slightly older than these obtained in their Spanish equivalent (Alpujarrides). The Gibraltar arc is divided into several independent crustal blocks separated by major fault zones perpendicular to the coast that could have induced independent vertical movements during the entire Neogene.

### 3.8.20 (p) Le massif du Lévézou : une suture varisque dans le Massif Central ?

Caroline Lotout<sup>1</sup>, Pavel Pitra<sup>1</sup>, Marc Poujol<sup>1</sup>, Gilles Ruffet<sup>1</sup>, Ermete Tondella<sup>1</sup>, Jean Van Den Driessche<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

La chaîne Varisque est classiquement interprétée comme le résultat d'une subduction océanique suivie d'une collision continentale de type himalayen. Les reliques d'éclogites et d'ophiolites, souvent regroupées dans le Groupe Leptyno-Amphibolique (GLA), représentent les traces de l'océan subducté. Le GLA sépare donc des continents (ou leurs fragments) différents (p.ex. Gondwana, Armorica). Dans le Lévézou (sud du Massif Central) le GLA sépare des roches supposées appartenir à l'unité des gneiss inférieurs (i.e. Gondwana) de l'unité des gneiss supérieurs (i.e. Armorica). L'ensemble est intrudé, de part et d'autre du GLA, par des granites déformés (type « Pinet ») interprétés comme syntectoniques de la collision varisque. Nos données structurales, pétrologiques et géochronologiques sur ce massif contredisent cette interprétation. Le caractère porphyrique de l'orthogneiss du Pinet et la présence de deux déformations superposées sont incompatibles avec une mise en place syntectonique et le développement de structures cognétiques de type C/S, tel que décrit précédemment. D'autre part, le développement de paragenèses métamorphiques (p.ex. remplacement de la cordiérite magmatique par des paragenèses à disthène-phengite-grenat) suggère que l'orthogneiss a subi un métamorphisme de haute pression. La mise en place des protolithes des orthogneiss dans les différentes unités est contrainte à 469,8 ± 1,6 Ma et 467,4 ± 5,0 Ma (U/Pb sur zircons par LA-ICP-MS). Les âges Ar/Ar sur muscovites indiquent une déformation et un refroidissement vers 340 Ma. Enfin, à l'échelle du massif du Lévézou, les granitoïdes (y inclus l'orthogneiss du Pinet) situés de part et d'autre du GLA présentent des textures, des âges et des compositions chimiques identiques. Ils témoignent de la fusion d'une même source et d'un socle identique de part et d'autre de la suture, impliquant un domaine océanique initialement très restreint de type bassin arrière-arc.

### 3.8.21 (p) Champ de déformation du segment pyrénéen de la chaîne varisque

Bryan Cochelin<sup>1</sup>, Dominique Chardon<sup>1</sup>, Yoann Denèle<sup>1</sup>, Charles Gumiaux<sup>2</sup>, Benjamin Le Bayon<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>ISTO, Orléans

<sup>3</sup>BRGM, Orléans

La place des Pyrénées dans la chaîne varisque reste à ce jour problématique. Depuis près de quarante ans, les modèles divergent, décrivant les Pyrénées varisques comme une zone de rift, un avant-pays de chaîne de collision ou un domaine interne marqué par un important magmatisme et un métamorphisme de haute température. D'autre part, alors que l'interprétation d'une déformation à composante transcurrente semble le plus communément admise à partir des études locales ou régionales, l'existence de structures subhorizontales dans des dômes métamorphiques (infrastructure) coexistant avec les structures verticales des domaines peu métamorphiques sus-jacents (superstructure) suggère une histoire tectonique tridimensionnelle plus complexe. De ce fait, la croûte varisque des Pyrénées constitue un objet de choix pour étudier le comportement mécanique et l'évolution de la croûte orogénique, dans le temps et dans l'espace. Dans ce but, notre travail consiste dans un premier temps en une compilation du champ de déformation de la croûte varisque à l'affleurement dans la zone axiale des Pyrénées. Cette compilation, inédite à l'échelle du segment pyrénéen de la chaîne varisque, est basée sur l'intégration des données structurales de l'ensemble de la bibliographie régionale, comprenant structures et fabriques planaires (schistosités, foliation, etc) et linéaires (linéations, critères de sens de cisaillement, etc). Enfin, l'interprétation de ce champ de déformation est étayée par les premiers résultats d'une campagne de terrain au travers de deux exemples. Le premier met en évidence le partitionnement tridimensionnel de la déformation à la transition entre infrastructure et superstructure (dôme de Bossost); le second vise à contraindre l'empreinte des déformations tardi-varisques et alpines sur l'allure du champ de la déformation finie dans les niveaux superficiels de la croûte (Vallée d'Aspe).

### 3.8.22 (p) Exemple d'un modèle réduit du poinçon Maghrébin (El Abiodh Sidi Cheikh, Atlas Saharien Occidental, Algérie)

Souhila Megherbi<sup>1</sup>, Abdellah Bettahar<sup>1</sup>, Kamel Hachour<sup>2</sup>, Salim Guelmi<sup>1</sup>, Rabah Djeddi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>USTHB, El-Alia Alger, Algérie

<sup>2</sup>SONATRACH, Sonatrach division exploration, Boumerdès, Algérie

La région d'El Abiodh Sidi Cheikh appartient aux monts des Ksour qui constituent l'Atlas Saharien Occidental.

Le secteur d'El Abiodh Sidi Cheikh est structuré sous forme de grands plis arqués d'orientation NE-SW, tronqué au Sud par l'Accident Sud Atlasique de même direction, l'analyse des éléments structuraux répertoriés nous a permis de mettre en évidence plusieurs phases de déformation, les plus importantes sont :

- La phase Atlasique : joue en transpression E-W donnant naissance à l'Accident Sud Atlasique avec un mouvement décrochant à décrochevauchant dextre.
- La phase Miocène : correspond à un raccourcissement subméri-dien qui engendre les systèmes d'accidents conjugués N-S sénestre et NW-SE dextre, elle est responsable du rejeu inverse de l'Accident Sud Atlasique et des accidents de même direction, elle engendre des failles inverses chevauchants aux bordures Sud et Nord

du secteur, et structure toute la région en grands plis NE-SW et déverse toute la région vers le Sud sur son avant-pays. Cette dernière phase engendre une structure complexe, qui se présente sous forme d'un poinçon avec une aile orientale constituée par une transverse NW-SE dextre et une aile occidentale formée par une transverse NNE-SSW sénestre.

La région de El Abiodh Sidi Cheikh ne représente qu'un model réduit du poinçonnement dans l'Atlas Saharien.

En effet, au Maghreb, cette phase alpine conduit au poinçonnement de la partie centrale de l'Afrique du Nord ; avec l'Atlas Saharien Central et Occidental en position frontale coincé entre l'Atlas Marocain et les Atlas Saharien Oriental/Tunisien, formant respectivement les ailes occidentale et orientale du poinçon Maghrébin.

### 3.8.23 (p) Le Massif des Rehamna (Meseta marocaine) : témoin d'un changement majeur de la dynamique des plaques au Carbonifère supérieur - Permien inférieur au sein de l'orogène varisque - allégénien

Francis Chopin<sup>1</sup>, Michel Corsini<sup>2</sup>, Karel Schulmann<sup>3,4</sup>, Mohamed El Houicha<sup>5</sup>, Jean-François Ghienne<sup>3</sup>, Jean-Bernard Edel<sup>3</sup>

<sup>1</sup>University of Helsinki, Department of Geosciences and Geography, Finlande

<sup>2</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>3</sup>IPG Strasbourg

<sup>4</sup>Czech Geological Survey, Prague 1, République tchèque

<sup>5</sup>Université Chouaib Doukkali, Département de Géologie, Faculté des Sciences, Maroc

L'absence d'étude moderne dans le varisque marocain associant étude structurale, métamorphique et géochronologique freine toute avancée significative sur son évolution tectonique et sur les corrélations géodynamiques avec les autres branches adjacentes de l'orogène varisque-allégénien en Europe et en Amérique du Nord au Paléozoïque supérieur. Dans le massif des Rehamna (Meseta marocaine), trois épisodes tectoniques ont été mis en évidence. (1) Chariage vers le SSO de formations ordoviciennes sur le socle néoproterozoïque à cambrien et ses bassins intracontinentaux dévono-carbonifères. Cet événement entraîne un cisaillement ductile horizontal et un métamorphisme prograde Barroviens au sein des roches enfouies. (2) Il résulte de ce raccourcissement la formation d'un dôme syn-convergent d'allongement ~E-O permettant l'extrusion des unités inférieures et le détachement des unités supérieures métamorphiques. Ces épisodes sont contraints à 310-295 Ma par les âges 40Ar/39Ar de refroidissement et de cristallisation métamorphique d'amphiboles et de micas. (3) Une convergence de direction ONO, orthogonal au précédent, permet l'accrétion finale de toutes les unités sur le socle continental plus à l'ouest. Les âges 40Ar/39Ar de refroidissement d'amphiboles d'un leucogranite syn-tectonique et de son encaissant, ainsi que les âges de cristallisation de muscovites d'une mylonite, démontrent que cet épisode prend place entre 295 et 280 Ma. La fin de l'orogène varisque dans cette partie de la Meseta marocaine est contrainte par l'âge de refroidissement d'un batholithe granitique post-tectonique à 275 Ma. Ces événements, confrontés d'abord à l'évolution de la Meseta marocaine, sont enfin mis en relation avec la géodynamique globale des continents Laurentia et Gondwana à la fin de l'orogène varisque-allégénien, montrant le changement des contraintes aux limites dans la chaîne au Carbonifère supérieur-Permien inférieur au Maroc, en Europe et en Amérique du Nord (Appalaches).

### 3.8.24 (p) New thermobarometrical analysis in the Montagne Noire gneiss dome (French, Massif Central) : Implication for the late Variscan orogenic evolution

Kévin Fréville<sup>1</sup>, Bénédicte Cenko-Tok<sup>1</sup>, Mickaël Rabin<sup>2</sup>, Pierre Trap<sup>2</sup>, André Leyreloup<sup>1</sup> Jean-Luc Regnier<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier

<sup>2</sup>Laboratoire Chrono-environnement, Montbéliard

<sup>3</sup>Savas.Cad., Antalya, Turquie

The Montagne Noire Axial Zone (MNAZ) gneiss dome is an interesting case-study to discuss i) the thermo-mechanical behavior of the deep crust in relation with its upper counterpart and ii) the building of gneiss domes within the hot Variscan belt. Our study here focuses on thermal evolution of the eastern part of the MNAZ in relation with its structural framework.

In order to estimate pressure-temperature conditions of peak metamorphism as well as the thermal impact of the migmatitic core on the metasedimentary cover, we present new P-T calculation for the gneissic core and quantified thermal gradients within the surrounding micaschist envelop. Calculations were performed using the minimization of free Gibbs energy (Theriak-domino software, Capitani and Petrakakis (2010)), Raman Spectroscopy on Carbonaceous Matter (RSCM, Beyssac et al. (2002)) and Garnet-Biotite thermometry. Our results show that within core of the gneiss dome is affected by high-temperature/moderate-pressure metamorphism ( $8.65 \pm 0.25$  Kbar,  $685 \pm 5$  °C) followed by near isothermal decompression. Within the micaschist envelop, three distinct thermal gradients have been estimated according to their structural position. Thus, along the northern flank of the gneissic dome an apparent high thermal gradient of  $540$  °C/km is calculated mainly due to late brittle transtensional faulting. A second thermal gradient of  $29$  °C/km is obtained along an E-W trending profile located at the eastern domal termination where the meta-sedimentary pile did not suffer late brittle detachments. In between, a third NE-SW trending profile show a composite thermal gradient with a  $52$  °C/km value that turns to  $277$  °C/km at the migmatitic gneiss/micaschist transition. These petrological results bring important new insights for the understanding of the tectonic setting of the MNAZ and for discussing the flow pattern of partially molten lower crust during late-orogenic evolution.

### 3.8.25 (p) Can the lower crust exhume under compressional tectonics at Variscan times ?

Muriel Gerbault<sup>1,2</sup>, Julie Schneider<sup>1</sup>, Michel Corsini<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>2</sup>GET, Toulouse

We aim at confronting a new conceptual model of orogenic evolution for the Maures-Tanneron Massif (MTM) with thermo-mecanic modelling. The MTM belongs with Sardinia and Corsica to the Southern segment of the Variscan Belt. The new conceptual model adds to the classical nappe stacking scenario a significant contribution from gravitational processes, triggered by partial melting during convergence. In this model, after oceanic subduction, continental collision and subsequent nappe stacking (stage 1), a stage of backthrusting associated to thermal maturation is proposed (stage 2). During stage 2 widespread partial melting occurred, and deep-seated rocks were exhumed in an internal domain that partially reshaped the original nappe stacking architecture. The internal domain dominated by migmatites is decoupled from the external domain where early nappes are preserved. This exhumation process is thought to have occurred in a continuous compressive regime as

evidenced by field structures, associated to granitoids intrusions. Final mass transfer was accommodated by lateral flow and transpression during orogenic thinning (stage 3).

With 2D modelling we explore the thermal maturation stage of the chain (stage 2), covering a time-window of only  $\sim 25$  My. We begin from a previously thickened orogenic wedge, and should reproduce crustal root exhumation before stage 3. Our numerical approach explicitly resolves the motion and heat equations with a finite differences formulation, and the volumetric fraction of melt is prescribed to evolve linearly with temperature. Rayleigh-Taylor instabilities develop from the accumulation of low density ductile melt in the buried continental crust, triggered by internal heating. The instabilities rise as volumic forces exceed compressional forces, but they may also entrain denser slices. Surface processes favor vertical exhumation through the more rigid upper crust along a channel several tens of km wide. Our results fit observed PTt data and structural geometries given slow far-field convergence of 0.5 cm/yr, an initial felsic orogenic wedge about 60 km thick producing radiogenic heating. A mantle heat source was not found appropriate. A crustal bulk viscosity of about  $2.10^{20}$  Pa.s was required, or else exhumation was either prevented or occurred to fast.

### 3.8.26 (p) Étude expérimentale de la fusion partielle sur la rhéologie et la microstructure de la croûte continentale

Julien Fauconnier<sup>1</sup>, Holger Stünitz<sup>2</sup>, Claudio Rosenberg<sup>1</sup>, Loïc Labrousse<sup>1</sup>, Laurent Jolivet<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>University of Tromsø, Tromsø, Norvège

<sup>3</sup>ISTO, Orléans

<sup>4</sup>BRGM, Orléans

Parmi les phénomènes capables de modifier le comportement mécanique de la croûte continentale lors de son implication dans un prisme orogénique, la fusion partielle apparaît comme un facteur affaiblissant de premier ordre. Pour mieux comprendre comment s'opère cet affaiblissement nous avons mené une série d'expériences à haute pression sur des analogues de croûte continentale partiellement fondue, afin de comparer microstructures expérimentales et migmatites naturelles. Des expériences ont été conduites dans un appareil de Griggs (U.Tromsø, Norvège). Au matériel de départ composé de 90 % de quartz et 10 % de biotite, 0, 5 ou 10 % de verre haplogranitique (HPG) ont été ajoutés. Les expériences ont ensuite été menées de part et d'autre de la transition vitreuse du verre pour simuler la fusion partielle. Nos premiers résultats montrent que : (1) la présence de liquide silicaté adoucit les échantillons pour les premiers incréments de déformation ( $\gamma < 2$ ) ; (2) une faible proportion de phase peu résistante (5 % de HPG ou 10 % de biotite) induit la nucléation de bandes de cisaillement ; (3). L'augmentation du taux de fusion partielle, simulée par l'augmentation de la quantité de HPG de 5 à 10 %, modifie radicalement les microstructures et diminue la résistance par 2. Ceci indique un changement de mécanisme de déformation du quartz qui passe de la plasticité intracrystalline au glissement aux joints de grain. (4) L'affaiblissement causé par 5 % de liquide dans un échantillon sans biotite à 800°C, est équivalent à celui induit par 10 % de biotite dans un échantillon sans fusion au delà de  $\gamma \approx 2$ . L'ensemble de ces observations est à mettre en regard de la répartition de la déformation dans un système de cisaillement syn-migmatitique : la zone de Møre-Trondelag, dans les Calédonides de Norvège.

### 3.8.27 (p) Contribution à la compréhension des processus de déformation crustale au Paléoprotérozoïque : à la lumière des événements métamorphiques et magmatiques enregistrés par le Birimien (2.2-2.0 Ga) d'Afrique de l'Ouest

Jérôme Ganne<sup>1</sup>, Sylvain Block<sup>1</sup>, Muriel Gerbault<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

Les données métamorphiques que nous avons pu acquérir sur les terrains d'âge Paléoprotérozoïque d'Afrique de l'Ouest nous permettent de discuter les mécanismes par lesquels une croûte précambrienne s'est formée, épaissie puis différenciée en l'espace de quelques dizaines de millions d'années, atteignant vers 2.1 Ga un profil thermique à l'équilibre dans ses parties moyennes et profondes (25-30 Km). Ces données sur l'évolution thermique de la croûte birimienne d'Afrique de l'ouest nous ont permis, plus généralement, d'appréhender celle de la lithosphère au Paléoprotérozoïque et de discuter le style tectonique des orogènes à cette époque. Comme beaucoup d'autres orogènes prenant place autour de la transition Archéen / Protérozoïque (2.5 Ga), le Birimien d'Afrique de l'Ouest est marqué par la mise en place d'une grande quantité de magma de nature granitique venant intruder des séries volcano-sédimentaires dans un contexte en raccourcissement général. Cette évolution crustale au Birimien est souvent décrite comme la marque de fabrication d'une tectonique archaïque associée à un géotherme perturbé et un manteau lithosphérique plus chaud et/ou moins rigide qu'à l'heure actuelle. Les données métamorphiques dont nous disposons sur cette séquence crustale birimienne montrent que cette production de magma granitique n'est pas la conséquence d'une température excessivement élevée à la racine (MOHO) de cette croûte mais qu'elle est le résultat d'un profil lithologique propice à la fusion. Nous interprétons la croissance de la croûte birimienne comme le résultat d'un orogène d'accrétion sur lequel surimpose un orogène de collision associé à un régime thermique modérément élevé (20-30 °C/Km). Cette collision s'accompagne néanmoins d'un magmatisme important, sans doute lié à la présence de matériaux fertiles et de composition felsique initialement présents en base de croûte. Ce profil lithologique immature semble être directement hérité du collage d'un ensemble d'arcs insulaires, caractérisés eux même par des profils lithologiques immatures. Cette importante production de magma a néanmoins profondément influencé le style tectonique (archaïque) de cet orogène au Paléoprotérozoïque.

References :

Ganne et al . (2012). Nature Geoscience, doi :10.1038/ngeo1321 ;

Ganne, J., Gerbault, M., Block, S. (2014). Precambrian Research, v. 243, p. 88-109.

### 3.8.28 (p) Burial and syn-orogenic exhumation in the Hellenides belt : structural and petrographic record in Southern Evia, Greece

Emmanuel Guillerm<sup>1</sup>, Olivier Vanderhaeghe<sup>1</sup>, Christophe Scheffer<sup>1</sup>, Alexandre Tarantola<sup>1</sup>, Lydéric France<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GeoResources, Nancy

<sup>2</sup>CRPG, Nancy

The Hellenides orogen constitutes a stack of nappes successively buried and exhumed during syn-orogenic and post-orogenic episodes. Post-orogenic exhumation, a late tectonic stage that is characterized by intense retrogression and thinning of the crust, is well-developed through the Aegean domain, so that former tectonic structures are not easily

identified. Evia island is the adequate place to study these former structures, where the Evia Thrust and the Pelagonian Fault, a tectonic contact whose kinematic is still debated, are located in a same area. Two superimposed generations of folds affect the Evia Thrust, both presenting ENE axial planes dipping North, with opposite top-to-the-SSE and top-to-the-NNW senses of shear. These axial planes are parallel to the Pelagonian Fault plane. We suspect these two successive generations of folds to witness burial followed by syn-orogenic extrusion. First, from early to late Oligocene, the Styra Nappe is thrust south-southeastward upon the Almyropotamos Unit along the Evia Thrust. At the end of burial, the Evia Thrust is folded in consistence with a top-to-the-SSE sense of shear. In a second step, the Almyropotamos Metaflysch Unit is carried upward along with the Styra Nappe, both units developing folds consistent with a top-to-the-NNW sense of shear. The phengite barometer applied on micaschists collected through a N-S transect yield pressures from 0.9 to 0.5 GPa close to the Pelagonian Fault and from 1.2 to 0.9 GPa away from the Pelagonian Fault. Accordingly we propose that the Pelagonian Fault represent a syn-orogenic low-angle detachment accommodating the southward extrusion of the Styra and Almyropotamos Metaflysch Units.

### 3.8.29 (p) Évolution magmatique et métamorphique permienne dans les Alpes : apports de l'unité de Campo (nappes Austroalpines)

Benoit Pétri<sup>1,2</sup>, Geoffroy Mohn<sup>3</sup>, Pavla Štípská<sup>1,4</sup>, Gianreto Manatschal<sup>1</sup>, Karel Schulmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Strasbourg

<sup>2</sup>Faculty of Earth and Life Sciences, VU Amsterdam, Pays-Bas

<sup>3</sup>GEC, Cergy Pontoise

<sup>4</sup>Center for Lithospheric Research, Prague, République tchèque

Le stade final de l'orogénèse varisque est caractérisé par une intense activité tectonique, magmatique et métamorphique. Au Permien, des intrusions mafiques et felsiques sont mises en place dans tous les niveaux crustaux associés à un métamorphisme de contact. Alors que la plupart des études se concentrent soit sur la formation de bassins permien, soit sur les processus magmatiques et métamorphiques dans la croûte inférieure, une description du comportement de la croûte moyenne reste manquante. Ainsi, cette étude vise à caractériser les processus actifs dans la croûte moyenne permienne durant l'extension post-orogénique varisque. Ici, nous étudions l'auréole métamorphique de contact autour du gabbro permien de Sondalo, exposé dans l'unité Austroalpine de Campo (Italie du Nord). Ce travail couple géologie structurale, pétrologie métamorphique et géochronologie.

La présence de paragenèses à Grt-St dans les micaschistes portant les fabriques S2 et S3 témoigne d'un chemin prograde barrovien pré-permien. L'unité de Campo subi ensuite un réchauffement quasi-isobare, sans déformation apparente, autour de 4 kbar, menant à la cristallisation d'And et Crd. Le gabbro (~290 Ma, U-Pb sur Zrn) intrude l'unité à ~6 kbar en produisant des xénolites composés de granulite à Grt-Sil-Crd-Spl, immédiatement suivi d'une décompression amenant à sa mise en place finale à ~4 kbar lors du développement d'une nouvelle fabrique migmatitique S4, localisée autour du pluton.

Ces résultats apportent des contraintes importantes sur les relations thermiques et mécaniques entre le pluton et l'encaissant. Cette étude montre une évolution contrastée des systèmes de croûte moyenne par rapport aux systèmes de croûte inférieure comme la zone d'Ivrée par exemple. À plus grande échelle, ces résultats apportent des informations clés pour la compréhension des processus tectoniques et magmatiques, ainsi que sur les conditions thermiques de la croûte continentale lors de l'évolution post-orogénique varisque.

### 3.8.30 (p) P-T-t-d evolution of orogenic middle crust of the Roc de Frausa Massif (Eastern Pyrenees)

Carmen María Aguilar Gil<sup>1</sup>, Montserrat Liesa Torre-Marín<sup>1</sup>, Pavla Štípská<sup>2,3</sup>, Karel Schulmann<sup>2,3</sup>, Josep Anton Muñoz<sup>4</sup>, Josep Maria Casas<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Barcelona, Espagne  
<sup>2</sup>IPG Strasbourg

<sup>3</sup>Center for Lithospheric Research, Czech Geological Survey, Prague, République tchèque

<sup>4</sup>Institut de Recerca Geomodels - Departament de Geodinàmica i Geofísica, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Espagne

Thermodynamic modelling together with structural, petrological and geochronological studies have allowed to develop a model of the P-T-t-d evolution of the Roc de Frausa Massif (Eastern Pyrenees). The Pre-Variscan sequence is divided into three units (Upper, Intermediate and Lower series) separated by two gneiss sheets and intruded by Variscan igneous rocks. Variscan deformation is characterized by an originally sub-horizontal foliation (S1) and by syn-schistose folds refolded by regional scale upright to tight NE-SW folds (F2) facing to the NW. D2 heterogeneously overprints D1 developing an axial plane foliation (S2) in high-grade metamorphic domains. Metamorphic zoning is broadly parallel to S1 foliation. Metamorphism increases with depth and shows : andalusite, sillimanite and cordierite (Upper series), sillimanite and cordierite (Intermediate series) and relic garnet and cordierite (Lower series). A calc-alkaline composite granitoid intruded on top of the sequence, parallel to S1 and an sillimanite-cordierite aureole was formed around it. A gabbro-diorite stock was emplaced in the Intermediate series coevally with the D2 event, producing a narrow aureole with sillimanite, garnet and cordierite migmatites.

The early metamorphic history (320-315 Ma) is associated with the S1 fabric. P-T paths indicate conditions from 580°C to 640°C at ~3.4kbar in the Upper series and up to 730°C and ~7kbar in the Intermediate series contact aureole. This stage is interpreted as a result of horizontal middle crustal flow associated with progressive heating. At the end of D1 (c. 311 Ma) intruded the granitoid sheet. The upright F2 folding and S2 foliation are associated with isothermal decompression around ~3 kbar, coeval with the intrusion of mafic rocks (c. 307 Ma). The D2 tectono-metamorphic evolution can be explained by crustal scale doming accompanied by a massive flux of mafic magmas into the core of the antiform.

### 3.8.31 (p) U-Pb ages and zircon geochemistry in Variscan igneous rocks from the Roc de Frausa massif (eastern Pyrenees)

Carmen María Aguilar Gil<sup>1</sup>, Pedro Castiñeiras<sup>2</sup>, Montserrat Liesa<sup>1</sup>, Marina Navidad<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Espagne

<sup>2</sup>Departamento de Petrología y Geoquímica, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Espagne

In magmatic rocks, the correlation of Ti-in-zircon temperatures with various elements and element ratios allows us to pinpoint petrogenetic processes such as fractionation and recharging of magma chambers, which would be otherwise disregarded. The combination of such petrogenetic information with isotopic ages is essential to understand the evolution of the igneous system. We have obtained compositional and isotopic data of zircon from a tonalite of the San Llorenç-La Jonquera batholith and

the Ceret gabbro, both located in the Roc the Frausa massif (eastern Pyrenees).

Zircons from both samples display core-rim features, with more contrasting cathodoluminescence textures in the gabbro sample (non-luminescent cores and luminescent rims. Ages in cores and rims are also different in both rock types. In the tonalite, cores yield a mean age of  $314 \pm 2$  Ma, and rims yield a mean age of  $311 \pm 1$  Ma. Compositionally, the tonalite zircons show rough differences between cores and rims, suggesting that both areas were originated in magmas with different chemical characteristics. The chemical composition differences are more pronounced between core and rim from the gabbro. The non-luminescent cores correspond to an early magmatic pulse that occurred at  $312 \pm 2$  Ma. They grew from a more evolved magma where most of the plagioclase had already crystallized, in accordance with the lower values for Eu anomalies. The luminescent rims correspond to a second pulse that took place at  $307 \pm 4$  Ma. They originated from a less evolved magma where plagioclase had not completely crystallized, as suggested by the lower Hf content and the shallower Eu anomaly. The absence of meso- and microscopic evidence of physical mixing (mingling) suggests that the mixture was complete; therefore, the existence of these two magmatic pulses is recorded only in zircon. In summary, zircon geochemistry suggests a complex magmatic history for the Sant Llorenç-La Jonquera suite and the gabbro Ceret stock. This history includes several pulses of magma and mixing of magmas with different geochemical characteristics. Moreover, the chemistry of zircon supports the previous models stating that these two igneous bodies are geochemically diverse and they belong to genetically distinct igneous suites produced in different levels of the lithosphere.

### 3.8.32 (p) Étude structural et métamorphique du dôme gneissique du Canigou (Pyrénées Orientales)

Benjamin Le Bayon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

Le massif du Canigou est un dôme de foliation constitué d'un ensemble d'orthogneiss reposant sur les micaschistes de Balatg et surmonté par la formation de Canaveilles d'âge fini-Protérozoïque à Cambrien inférieur (Castineiras et al., 2008). Plusieurs modèles ont été proposés pour la formation du dôme et de sa mise en place : (i) Modèle de pli couché de style pennique (Autran et Guitard, 1969) plissant la discordance entre un socle granitique cadomien et sa couverture sédimentaire paléozoïque ; (ii) modèle de dôme extensif (Gibson, 1991) qui permet d'expliquer le métamorphisme rétrograde pendant le développement de la foliation principale ; (iii) modèle d'Anticlinal de Nappe, avec le fonctionnement d'un chevauchement hercynien majeur, à vergence SW situé à la base des gneiss, définissant ainsi une nappe (Lagarde, 1978).

Plus tard, un âge ordovicien (475 Ma) (Deloule et al., 2002) a été obtenu pour les orthogneiss du Canigou. Ce nouvel âge a permis d'invalider le premier modèle et de proposer le modèle suivant : (iv) un laccolithe intrusif dans la Formation de Canaveilles, (Barbey et al., 2001).

L'auteur présentera :

- Une étude structurale et pétrologique des gneiss du Canigou, du contact avec les formations métasédimentaires environnantes réalisée lors du lever de la carte de Prats de Mollo (1/50 000). Cette étude a permis de mieux documenter le style, l'intensité, et la répartition de la déformation au sein du dôme, et de mieux connaître les conditions métamorphiques lors de la formation de la foliation régionale et des zones mylonitiques.

- Une nouvelle vue sur le contact tectonique du Puigmal. Avec la présentation de coupes détaillées réalisées dans le secteur de Nuria qui constitue une zone clé pour la compréhension des différentes phases de

déformation.

A partir de ces nouvelles données, l'auteur vous proposera un modèle géodynamique préliminaire pour l'exhumation du dôme du Canigou.

### 3.8.33 (p) Detrital zircons from the pre-Silurian rocks of the Pyrenees : Geochronological constraints and provenance

Aina Margalef Porcar<sup>1</sup>, Pedro Castiñeiras<sup>2</sup>, Josep Maria Casas<sup>3</sup>,  
 Marina Navidad<sup>2</sup>, Montserrat Liesa<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Centre d'Estudis de la Neu i de la Muntanya d'Andorra, Institut d'Estudis Andorrans, Sant Julià de Lòria, Andorre

<sup>2</sup>Departamento de Petrología y Geoquímica, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Espagne

<sup>3</sup>Departament de Geodinàmica i Geofísica-Institut de recerca GEOMODELS Universitat de Barcelona, Espagne

<sup>4</sup>Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica Universitat de Barcelona, Barcelona, Espagne

We have carried out for the first time a detrital zircon study in the eastern Pyrenees (Andorra). The four samples selected are located in the vicinity of the Upper Ordovician La Rabassa unconformity. Three of them were sampled just below it, and correspond to quartzites interbedded in the uppermost part of the Jujols Group, a rather monotonous, 1500 m thick, succession composed of a rhythmic alternation of sandstone, siltstone and argillite. The other sample was taken just above the La Rabassa unconformity, from the Bar Quartzite Fm., located in the uppermost part of the Upper Ordovician succession.

A total of 540 laser ablation ICP-MS U-Pb analyses were made, but 101 of them were discarded because of their discordance. The maximum depositional age for the Jujols Group samples based on the youngest detrital zircon population is  $478 \pm 5$  Ma; whereas for the Bar Quartzite Fm. is  $443 \pm 6$  Ma (Late Ordovician-Early Silurian). All the samples show very similar U-Pb age patterns. The main age populations correspond to Cambro-Ordovician (480-510 Ma), Ediacaran (550-750 Ma), Tonian-Stenian (850-1100 Ma), Paleoproterozoic (1.9-2.1 Ga) and Neoproterozoic (2.45-2.65 Ga).

The absence of a Middle Ordovician age population suggests a lack of sedimentation at this time and confirms the presence of an unconformity at the base of the Upper Ordovician succession, already evidenced by structural, stratigraphic and cartographic criteria. The similar age patterns on both sides of the intraordovician discordance implies that there is no change in the source area of both series.

The obtained age patterns have also been compared with those from other peri-Gondwanan terrains, such as Sardinia and NW Iberia. The similarity with the Sardinian age distribution suggests that they could share the same source area and they were paleogeographically related at Ordovician times, that is, in front of the Arabian-Nubian Shield.

### 3.8.34 (p) New palaeobotanical data in the Lower Carboniferous of the Eastern Pyrenees : Implication for the aging of the Variscan deformation

Sergi Trias<sup>1</sup>, Carles Martín-Closas<sup>1</sup>, Josep Maria Casas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departament d'Estratigrafia, Paleontologia i Geociències Marines, Universitat de Barcelona, Espagne

<sup>2</sup>Departament de Geodinàmica i Geofísica-Institut de recerca GEOMODELS Universitat de Barcelona, Espagne

The pre-Variscan rocks of the Pyrenees record a polyphase deformation related to the main period of Variscan crustal thickening and a low-pressure-high-temperature metamorphism. In the Pyrenees dating evidence for the main Variscan shortening event is scarce. In the low-grade metamorphic domains data are provided by the age of the synorogenic Carboniferous Culm deposits. However, the direct dating of these deposits is difficult, as till now its age has been estimated on the basis of the dating of the last limestones on which it lies, and on the dating of the clasts reworked on the Culm conglomerates. It should be noted that both methods give a maximum age. In the medium to high-grade metamorphic areas, geochronological ages of regional metamorphism or intrusive magmatic bodies constrain the age of the main Variscan deformational structures. However, both methods usually provide a minimum age, as main Variscan structures predate both thermal events. In this contribution we present new palaeobotanical data that allows us to assign a Namurian age to the Culm deposits of the La Cerdanya area and thus constrain the age of the Lower Carboniferous succession in the Eastern Pyrenees. The plant assemblage is mainly formed by sphenophyte remains (genera *Archaeocalamites* and *Calamites* (*Mesocalamites*)) and the early seed plants (genus *Cardiocarpus*). These are the first direct age data obtained in these rocks that may contribute, in turn, to shed light about the timing of the Variscan deformation in the Pyrenees.

### 3.8.35 (p) New insights on the structure of Palaeozoic rocks of Andorra, Central Pyrenees

Aina Margalef Porcar<sup>1</sup>, Josep Maria Casas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centre d'Estudis de la Neu i de la Muntanya d'Andorra - Institut d'Estudis Andorrans, Sant Julià de Lòria, Andorre

<sup>2</sup>Departament de Geodinàmica i Geofísica-Institut de recerca GEOMODELS, Barcelona, Espagne

New 1 :25.000 geological mapping has been done in south Andorra, Central Pyrenees. Most of the study area is made up by low-grade metasediments ranging in age from Uppermost Cambrian-Lowermost Ordovician to Middle Devonian, and affected by Hercynian and Alpine orogenic events. The macrostructure of the study area is defined by E-W trending kilometric sized south-verging folds, classically known from south to north as the Rabassa dome, the Llavorsí syncline and the Massana anticline. Field observations and cartographic evidence reveal a repetition of Silurian and Devonian series not observed in the pre-Silurian series. Moreover, large ribbons of Silurian rocks crop out in the core of the Llavorsí syncline and in the limb of the anticlines, bounded by north dipping thrusts. Some of these thrusts appear as subtractive contacts, while others are additive contacts, a fact that has been object of several interpretations in the past. In addition, some folds are cut by thrusts. All these observations lead us to propose a new model for the structure of this region based on two successive deformational events. A first deformation phase affecting the Silurian and Devonian rocks is characterized by folds and south-verging thrusts with its detachment level at the Silurian black slates. A second deformational event gave rise to another fold and thrust system affecting the entire series, and deforming the previous thrusts and folds. Major E-W directed south-verging thrusts were formed on this second event, rooted deeper than the first ones, at least in Cambroordovician rocks, affecting the entire edifice and giving rise to complex geometries and subtractive contacts. Relationships between thrusts and cleavage formation are also discussed.

### 3.8.36 (p) Panafrican micaschist from Variscan Corsica : Detrital zircon U-Pb-Hf constrains on provenance and crustal evolution

Dov Avigad<sup>1</sup>, Philippe Rossi<sup>2</sup>, Axel Gerdes<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hebrew University of Jerusalem, Israël

<sup>2</sup>Commission de la Carte Géologique du Monde, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Paris

<sup>3</sup>J. W. Goethe Universität, Institut für Geowissenschaften, Allemagne

Northern Corsica exposes Pan-African mica schist lying under a non metamorphosed Paleozoic succession. The Pan-African micaschist, related to Armorica, crop out in the areas of Galeria and the Agriate desert. U-Pb-Hf analyses of detrital zircons from a micaschist sample of SW Agriate were performed in order i) to better constrain the age and origin of the metasediments ii) improve knowledge on crustal growth and recycling in Northern Gondwana and ii) bridge the gap with other Pan-African units in peri-Gondwana terranes. In a relative probability plot, 96 concordant La-ICP-MS U-Pb analyses revealed a wide age distribution. A preponderance of the zircons yielded Neoproterozoic ages concentrating between 0.72-0.53 Ga with major age peaks defined at 0.59Ga and 0.65Ga. A few zircons yielded Grenvillian (0.9-1.1 Ga) as well as older Mesoproterozoic ages and a number of detrital zircons yielded 2.2-1.9-Ga (Late-Paleoproterozoic, Eburnian). The oldest zircons detected are 2.7 and 2.9 Ga.

The youngest detrital zircons are Late Ediacaran to earliest Cambrian (0.53Ga) defining the maximum age of deposition of the Pan-African schists. Previous U-Pb detrital zircon analyses from the Ciuttone Ordovician Formation, unconformably lying on the Panafrican mica schist near Galeria, provided Lower Paleozoic and Neoproterozoic ages among which the youngest was recorded at 530±15 Ma with a good fit with data from Agriate.

The Corsican Neoproterozoic micaschist was fed from a nearby arc terrane where igneous activity lasted from ca 700 to 530 ± 20 Ma. Although the provenance hosted some Neoproterozoic juvenile material [ $12 < \epsilon_{\text{Hf}} < 10$  in 20 % analyses], the  $-12 < \epsilon_{\text{Hf}} < -1$  values [80 % an.] indicate significant involvement of an older crust. Many of the Neoproterozoic zircons yielded Meso- and Paleoproterozoic TDM(Hf) ages. The vertical spread of  $\epsilon_{\text{Hf}}$  values of Neoproterozoic zircons indicates mixing of old crust with juvenile magmas supporting the provenance involved Panafrican to Cadomian crustal growth in an Andean-type environment. The presence of Eburnean-aged detrital zircons (especially those [60%] with positive  $\epsilon_{\text{Hf}}$ ) may indicate the arc evolved on, or fringed the West Africa craton. However, the source of the small, number of Stenian-aged zircons (previously detected as inherited in Variscan granites from Corsica batholith), as well as of other Mesoproterozoic-aged detrital zircons, is still to be disclosed.

### 3.8.37 (p) Geological patterns of the pre-Mesozoic substratum of the Paris Basin revealed by recent regional geophysical data

Julien Baptiste<sup>1</sup>, Guillaume Martelet<sup>1</sup>, Michel Faure<sup>2</sup>, Laurent Beccalotto<sup>1</sup>, José Perrin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>ISTO, Orléans

The northwestern basement of France experienced at least 3 orogenic cycles : the Paleoproterozoic Icartian cycle (2000 Ma) still poorly documented, the Cadomian orogeny (760-540 Ma), and the poly-orogenic

Variscan one (500-300 Ma). It is now recognized that these cycles are punctuated by sequences of compressional and extensional tectonic episodes. However, the general geodynamic setting, the succession of stress fields as well as a detailed chronology of these episodes are still under debate. In the field, it is often difficult to distinguish between neoforced structures from inherited ones, as each cycle partly reactivated earlier structures. Moreover, the Cadomian and Variscan structures are partly hidden underneath the Mesozoic sedimentary cover of the Paris Basin, which is itself was structured during the Mesozoic and Cenozoic eras. Compilation, processing, and interpretation of new aeromagnetic surveys combined with up-to-date gravity data of a large western part of the Paris Basin offer an unprecedented insight into the Paris Basin pre-Mesozoic buried substratum. Running on from the geology of the Armorican Massif, our first observations reveal, for instance, the continuity of late Cadomian post-orogenic plutons, and Cambro-Ordovician magmatism on a large part of the eastern extension of the buried north Armorican domain. Another outstanding structural pattern is represented by a series of regional NW-SE striking faults which appear to have played a significant role in the opening of the late-Variscan Permian basins, and also probably during the Mesozoic, as a result of the opening of the North Atlantic Ocean. These preliminary observations complemented by structural and petrophysical analyzes, seismic data, as well as deep borehole information, provide new insights on the lithological and structural nature of the pre-Mesozoic rocks, and their structural history at the junction between the Armorican Massif, Massif Central, and eastern part of Paris Basin.

### 3.8.38 (p) Influence de l'héritage structurale sur l'organisation de la déformation fragile : étude de la zone Saxo-thuringienne des Vosges en bordure du fossé rhénan dans le secteur de Saint Dié-Strasbourg

Lionel Bertrand<sup>1</sup>, Yves Géraud<sup>1</sup>, Marc Diraison<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GeoRessources, Nancy

<sup>2</sup>Université de Strasbourg

Plusieurs sites de production d'électricité à partir de fluides géothermiques de hautes températures (env 200°C) sont en cours de prospection dans le Fossé Rhénan. Les réservoirs-cibles sont situés dans le socle à l'interface avec la couverture sédimentaire, en général à une profondeur de 5 à 6 km. Pour caractériser ces réservoirs, une analyse des analogues de surface sur les épaules du fossé est réalisée.

Le but de l'étude est de caractériser la déformation fragile à l'affleurement dans les Vosges à l'aide de profils de fracturation répartis dans le massif. Cette déformation est influencée par l'héritage structural de l'orogénèse Hercynienne ainsi que par les déformations pré-ouverture du fossé rhénan. Nous nous sommes pour cela consacrés à la partie Saxothuringienne du socle Hercynien affleurant dans les Vosges du Nord ainsi qu'à sa couverture Permienne et triasique proche. Ce socle est composé de séries volcano-sédimentaires métamorphisées intrudées par l'important complexe magmatique du Champ-du-Feu. Différents ordres de grandeurs de blocs et de structures bordières ont pu être mis en évidence. Les failles bordières de ces blocs sont orientées N-S, N135, et N40 et N90 et subdivisent les blocs de premiers ordres en sous-blocs de second et de troisième ordre dont la taille varie de la dizaine de kilomètre au kilomètre. Les paramètres comme l'orientation des structures d'extension, leurs densités et leurs localisations sont ainsi dépendant des événements tectoniques antérieurs à l'ouverture des rifts. L'étude de ces paramètres à l'affleurement en marge des fossés d'effondrement peut ainsi nous permettre d'appréhender l'influence de cet héritage sur le rifting ainsi que la structure du socle et l'organisation du remplissage sédimentaire dans le fossé. Combiné à cela, une étude des propriétés

petrophysiques est menée afin de déterminer l'influence de la déformation fragile sur les propriétés de transferts du socle et de son interface avec les sédiments, notamment la création d'une porosité de fractures et l'altération qui y est associée.

### 3.8.39 (p) Lithospheric structural control on inversion of the southern margin of the Black Sea basin, Central Pontides, Turkey

Nicolas Espurt<sup>1</sup>, Jean-Claude Hippolyte<sup>1</sup>, Nuretdin Kaymakci<sup>2</sup>, Ercan Sangu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>Middle East Technical University ODTU-METU, Department of Geological Engineering, Ankara, Turquie

<sup>3</sup>Kocaeli University, Department of Geological Engineering, Kocaeli, Turquie

The Black Sea is an isolated extensional basin formed from Cretaceous to Paleocene times behind a north-dipping Neotethyan subduction zone. To illustrate the structural evolution of the Black Sea basin in the context of Neotethyan subduction and subsequent continental collisions we present the first lithosphere-scale, ~250 km long, balanced cross section across its southern continental margin : the Central Pontides. Cross-section balancing was based on field, seismic reflection, geophysical and new apatite fission-track data. The structure of the onshore Pontides belt is predominantly controlled by inverted normal faults whereas the offshore areas are devoid of large structural inversion. Restored section indicates that Cretaceous crustal thinning occurred synchronously with exhumation of a fore-arc high-pressure blueschist wedge likely during Neotethyan slab retreat. Apatite fission-track data show that structural inversion of the fore-arc zone, that formed the Central Pontides thrust belt, started at ca. 55 Ma. This Eocene structural inversion followed upon collision of the Kırşehir continental block and the arrest of Neotethyan oceanic subduction below the Central Pontides. Compared to the Central Pontides belt, which underwent significant shortening (~28 km), the relatively colder and stronger Black Sea lithosphere prevented the northern offshore areas from inversion. Because the southern Pontides zone had no, or a thinned lithosphere during the Cretaceous, it played a major structural role in localizing contractional deformation since the early Eocene. This model may explain why the whole southern Black sea margin was inverted, creating the more than 1000 km long Pontides belt, whereas discontinuous inversions characterize its northern margin (Romanian offshore, Crimea and Great Caucasus). Thus, the large-scale temporal and spatial deformation of the Black Sea basin is mainly controlled by inherited lithospheric-scale heterogeneities.

### 3.9 Dynamique alpine : des structures profondes aux processus de surface

#### (Alpine dynamics : from deep structures to surface processes)

**Responsables :**

- Christian Sue (Chrono-environnement, Besançon)  
christian.sue@univ-fcomte.fr
- Stéphane Guillot (ISTerre, Grenoble)  
stephane.guillot@ujf-grenoble.fr
- Anne Paul (ISTerre, Grenoble)  
anne.paul@ujf-grenoble.fr

**Résumé :**

Session interdisciplinaire ouverte sur la structure et l'évolution de la collision alpine, incluant les thématiques suivantes :

- Structure profonde et imagerie sismique (CIFALPS, initiative AL-PARRAY, ...)
- Structure crustale, évolution du prisme orogénique, métamorphisme, géologie structurale
- Tectonique alpine, modèles d'évolution-reconstitution
- Néotectonique et évolution récente : sismologie, fracturation, géodésie
- Processus de surface, relations érosion-climat-tectonique
- Dynamique alpine, modélisation

### 3.9.1 (o) From the highest (Dent-Blanche klippe) to the deepest unit (Money window) : A kinematic model of the Western Alps

Michel Ballèvre<sup>1</sup>, Paola Manzotti<sup>1</sup>, Martin Engi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

<sup>2</sup>Institute of Geological Sciences, University of Bern, Suisse

The nappe stack of the Western Alps offers us a unique opportunity to discuss orogenic processes at crustal scale. Along and north of the ECORS-CROP seismic line, the nappe stack consists, from top to bottom, of (i) units derived from the Sesia-Dent Blanche continental fragment, (ii) ocean-derived units (Zermatt-Grivola, Tsaté), (iii) units derived from the distal part of the Briançonnais palaeomargin (Monte Rosa - Gran Paradiso), and (iv) units derived from more proximal part of this palaeomargin, now outcropping as windows (Money Unit). We have recently performed detailed mapping, structural analysis, metamorphic petrology and geochronology in both the highest (Dent Blanche) and the deepest (Money) units. As a synthesis, we will now discuss the metamorphic structure of the nappe stack, which is characterized by the following points :

- Units involved in the subduction zone at an early stage are thrust over units involved in the same subduction zone at a later stage, explaining why older eclogite-facies units (e.g. Zermatt-Grivola) are thrust on top of younger eclogite-facies (Monte Rosa- Gran Paradiso) units.
- After their subduction as more or less coherent pieces, some continental units are sheared during their exhumation, so that higher-pressure subunits (Gran Paradiso) are thrust over lower pressure ones (Money).
- The older nappe boundaries that occur at higher structural levels are deformed (folded and sheared) when the younger nappe boundaries are formed at deeper structural levels.
- Late brittle faulting (with up to 3km of vertical displacement) is a necessary requisite for understanding the present location of the nappe boundaries.

Geometric and petrologic data are used to construct a consistent kinematic model for this transect of the Western Alps, emphasizing the role of the inherited discontinuities from the pre-orogenic history, namely the Variscan orogeny, the Permian extension and the Jurassic rifting.

### 3.9.2 (o) Évolution structurale des massifs des Aiguilles Rouges/Mont Blanc : Nouvelles données U-Th-Sm/He sur zircon

Alexandre Boutoux<sup>1</sup>, Nicolas Bellahsen<sup>1</sup>, Raphaël Pik<sup>2</sup>, Yann Rolland<sup>3</sup>, Anne Verlaquet<sup>1</sup>, Olivier Lacombe<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>CRPG, Nancy

<sup>3</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

Au sein des unités externes Alpes de l'Ouest, le raccourcissement collisionnel s'exprime dans la croûte européenne en deux styles distincts : « thin-skinned » dans les chaînes subalpines et « thick-skinned » dans les Massifs Cristallins Externes (MCE) où la croûte a été enfouie sous les nappes internes. Le long du profil ECORS, la séquence de déformation et d'exhumation du massif du Mont Blanc de même que l'activation des chevauchements du bassin molassique suisse et du Jura sont assez bien contraints. Ces derniers ont pu être interprétés comme liés à l'activation de rampe sous le massif des Aiguilles Rouges ou alors comme s'enracinant au dessus de ce dernier. Nous apportons ici des données nouvelles d'U-Th-Sm/He sur Zircon pour contraindre l'exhumation des Aiguilles Rouges.

Les premiers résultats montrent une exhumation rapide des Aiguilles Rouges vers 6-8 Ma. Ces résultats ainsi qu'une synthèse de la littérature nous permettent de préciser la séquence des déformations collisionnelles de l'ensemble des MCE à cette latitude. Ainsi, lors de l'enfouissement à l'Oligocène des MCE, les premières déformations s'enregistrent dans le Mont Blanc (zones de cisaillement datées à 30 Ma) aux environs du pic de pression et de température. A cette même période, le bassin de Chamonix (socle et couverture) commence à s'inverser même si l'exhumation du massif du Mont Blanc ne devient significative que vers 22 Ma. Vers 15 Ma, la zone de sous placage de la croûte européenne s'étend vers l'Ouest avec l'initiation du chevauchement supérieur des Aiguilles Rouges connecté au chevauchement dans les Molasses subalpines et vers l'Est avec l'activation du rétro-chevauchement du massif du Mont Blanc. Vers 11 Ma, le Jura se plisse en lien avec le chevauchement inférieur du massif des Aiguilles Rouges, ce qui est compatible avec nos données montrant qu'il s'exhume depuis au moins 8 Ma. A cette période, les massifs du Mont Blanc et des Aiguilles semblent s'exhumer de manière sub-synchrone.

### 3.9.3 (o) Compatibilité entre thermopaléomagnétisme et thermochronologie dans le bassin de Bourg d'Oisans (Alpes occidentales) : nécessité de circulations de fluides intermittentes

Gilles Ménard<sup>1</sup>, Jean-Yves Josnin<sup>1</sup>, Bernhard Fuegensschuh<sup>2</sup>, Christian Crouzet<sup>3</sup>, Pierre Rochette<sup>4</sup>, Naïma Sabil<sup>5</sup>

<sup>1</sup>EDYTEM, Le Bourget du Lac

<sup>2</sup>Institute of Geology and Palaeontology University of Innsbruck, Autriche

<sup>3</sup>ISTerre, Le Bourget du Lac

<sup>4</sup>CEREGE, Aix en Provence

<sup>5</sup>Universität de München, Allemagne

L'enregistrement thermopaléomagnétique, basé sur la réaimantation des métasédiments jurassiques par de la pyrrhotite néoformée lors du refroidissement post pic du métamorphisme (360°C ; 27,6 Ma), permet de retrouver en continu une succession d'inversions magnétiques. Appliquée au bassin de Bourg-d'Oisans et après corrélation avec l'échelle magnétostratigraphique, cette méthode a permis de déterminer une courbe de refroidissement entre 320 et 220°C (données brutes : refroidissement rapide) ou 185°C (données corrigées : refroidissement lent) durant la période 24 à 20 Ma. Des datations par TF sur zircon ont été effectuées ultérieurement dans le socle sous-jacent pour valider le calage chronologique. Les échantillons prélevés près du contact montrent des âges alpins à 19-20 Ma, validant ainsi le calage chronologique. Des échantillons prélevés à une centaine de mètres du contact donnent des âges intermédiaires entre des âges anté-alpins et les âges alpins. Des datations déjà publiées obtenues plus au sud dans le massif du Pelvoux montrent des âges anté-alpins. Compte tenu de la température de fermeture du système pour les zircons (220-240°C), la persistance pendant plusieurs Ma dans les sédiments d'une température supérieure à cette température de fermeture aurait dû provoquer un rééquilibrage thermique du socle et une remise à zéro des âges TF. Ainsi pour lever cette contradiction il est nécessaire d'invoquer une succession d'épisodes de réchauffements de courtes durées (quelques années à quelques dizaines d'années) seulement compatible avec des circulations de fluides chauds intermittentes. La courbe de refroidissement déduite du thermopaléomagnétisme traduit ainsi un excès thermique initial dans les sédiments de plus de 100°C, excès qui tend à se réduire au cours du temps. Une modélisation hydro-thermique montre que les perméabilités qu'il faut envisager pour rendre compte des données thermiques sont de 3 à 4 ordres de grandeur supérieurs à la perméabilité actuelle, impliquant une

ouverture du milieu par des surpressions de fluides et :ou un régime de contrainte extensif.

### 3.9.4 (o) Collision et inversion des marges proximales européennes dans les Alpes externes occidentales

Nicolas Bellahsen<sup>1</sup>, Frederic Moutereau<sup>1</sup>, Alexandre Boutoux<sup>1</sup>, Olivier Lacombe<sup>1</sup>, Mathieu Bellanger<sup>2</sup>, Laurent Jolivet<sup>2</sup>, Romain Augier<sup>2</sup>, Charles Gumiaux<sup>2</sup>, Manfred Lafosse<sup>1</sup>, Laetitia Le Pourhiet<sup>1</sup>, Anne Verlaquet<sup>1</sup>, Yann Rolland<sup>3</sup>, Raphaël Pik<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>ISTO, Orléans

<sup>3</sup>GEOAZUR, Sophia-Antipolis

<sup>4</sup>CRPG, Nancy

Le but de cette contribution est de documenter et comprendre à la fois la cinématique des déformations collisionnelles à l'échelle des Alpes externes occidentales et le rôle de la structure de la marge européenne dans cette structuration orogénique.

Dans un premier temps, nous présentons des données nouvelles, structurales, microstructurales et géochronologiques, sur les déformations collisionnelles oligocènes du socle des massifs cristallins externes à la latitude du nord du massif de l'Oisans. La croûte s'est déformée de manière distribuée dans l'espace, pendant une période longue (10 My entre 35 et 25 Ma environ) et autour du pic de température. Ces données couplées au style structural suggèrent une croûte relativement faible, ceci en raison de l'héritage tectonique (bassins syn-rift jurassiques hérités), de l'enfouissement tectonique sous les unités internes et enfin des réactions adoucissantes qui se produisent pendant la déformation de la croûte (transformations feldspath-mica).

Dans un deuxième temps, nous proposons, à partir de coupes équilibrées, un style structural et une séquence de raccourcissement valable pour toute la zone externe (de la latitude de l'Oisans à celle du Mont Blanc). Notamment, le raccourcissement se fait en séquence, la couverture étant décollée au cours du Miocène.

Enfin, les coupes équilibrées montrent que le raccourcissement crustal augmente du sud au nord de 28 à 66 km (de 20 à 27%). Les taux de raccourcissement moyens sur chaque période de la séquence augmentent du sud au nord, ainsi que les taux d'exhumation. Cette évolution latérale est compatible avec les changements latéraux de distribution de la déformation dans le socle (sous plaquage vs. accretion frontale). Enfin, ces différences sont compatibles avec la structure probable du domaine Mésozoïque Valaisan dont la structure 3D pourrait expliquer les variations latérales de cinématique de la collision.

### 3.9.5 (o) The role of rift-inherited hyperextension for the formation of collisional orogens : Insights from the Alps

Geoffroy Mohn<sup>1,2</sup>, Gianreto Manatschal<sup>2</sup>, Marco Beltrando<sup>3</sup>, Isabelle Hauptert<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GEC, Cergy Pontoise

<sup>2</sup>IPG Strasbourg

<sup>3</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Torino

Recent discoveries in marine geophysics considerably changed the way we interpret rifted margins and as a consequence the way we may understand orogenic systems. Studies conducted in present-day rifted margins unravel the complex crustal architecture and spatial evolution of rift systems, formed by distinct domains including 1) equilibrated/weakly thin continental crust, 2) necking zones marking the transition from

weakly to highly thin continental crust, 3) hyperthinned domains floored either by severely thinned continental crust or exhumed subcontinental mantle and 4) eventually oceanic crust.

However, the resulting pre-orogenic template still awaits to be integrated in models focusing on mountain belts formation. In this presentation, we explore how the complexity of rift-inheritance, and in particular hyperextension, may control the evolution and final architecture of the collisional stage of orogenic systems such as the Alps.

Based on surface and geophysical data, we suggest that the architecture and evolution of Alpine orogeny are strongly controlled by rift inheritance. We propose that the architecture of the Alpine belt results from the orogenic collage of distinct domains of the former rifted margins. The intensity of the reactivation and inversion of these former domains within the orogen is a direct consequence of their pre-orogenic architecture and crustal thickness. The highly deformed internal part samples the remnants of hyperthinned domains whereas the weakly deformed external parts preserve domains that were only weakly affected by the rifting. Thus, the evolution of the Alpine orogen strongly depends on the architecture of the former rifted margins. The transition from subduction to collisional stage occurs when the necking zones and thick continental crust become involved in subduction, acting as buttresses. Eventually, the adoption of a more « realistic » pre-orogenic template may lead to a better understanding of mountain belt formation processes.

### 3.9.6 (o) The importance of rift inheritance during reactivation in a collisional orogen : The example of the Briançonnais domain in the Alps

Isabelle Hauptert<sup>1</sup>, Gianreto Manatschal<sup>1</sup>, Alessandro Decarlis<sup>1</sup>, Geoffroy Mohn<sup>2</sup>, Patrick Unternehr<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IPG Strasbourg

<sup>2</sup>GEC, Cergy Pontoise

<sup>3</sup>TOTAL, Paris-La Défense

The development of new refraction and reflection seismic imaging techniques enables to recognize and define different crustal domains in rifted margins, referred to as the proximal, necking and distal domains. In particular the distal domain is at present little understood and contains less studied architectural features including continental basement highs. Such continental highs occurring in the distal parts of hyper-extended rifted margins are often at deep water and sealed by thick sedimentary sequences. These points make their study complex and expensive. An alternative, less expensive way to study their nature, is to study remnants of such highs exposed in collisional orogens. One of the best-exposed examples is the Briançonnais domain exposed in the Western Alps.

Numerous studies showed and discussed the stratigraphic evolution of the Briançonnais ; however, few discussed the pre-collisional architecture of this former basement high and its importance and role during Alpine convergence. In our study we mapped the principal Alpine structure in the Briançonnais domain and tried to define their relationship to pre-Alpine, rift related structures. This enabled us to better understand the pre-Alpine architecture and paleogeographic position of the different units, as well as to investigate the importance of inherited rift structures during Alpine compression.

In our presentation, we will discuss the 3D architectural evolution of the Briançonnais and Prepiémontais domains based on a mapping and structural analysis of these domains in the field. The results of our study enable to show and discuss the importance of the pre-Alpine crustal architecture in controlling the Alpine evolution of the internal parts of the Alps during continental collision. Our results enable us also to

put the observations, including the stratigraphic architecture and their relationship with the top basement into a new paleogeographic framework and to propose a new evolutionary model for these domains. The comparison of field observations with seismic observations, from the present-day India and South-Atlantic rifted margins, show that many analogies can be found between fossil and present-day deep-water rifted margins.

### 3.9.7 (o) Manifestations diapiriques synsédimentaires dans le bassin du SE de de la France

Jean-Loup Rubino<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

Comme dans tout bassin où il existe une série salifère mobile, il n'est pas étonnant qu'un diapirisme précoce se manifeste dans le bassin du SE. Mais, faute d'une sismique moderne, seules les manifestations tardives et la tectonique gravitaire (Le Pichon et al. 2012) ont été analysées. Outre le style tectonique local, dit éjectif, qui se caractérise par une juxtaposition de synclinaux qui auraient dû interpellier la communauté depuis longtemps ; il existe un certain nombre d'indices du Jurassique au Tertiaire qui signent un diapirisme synsédimentaire. Les premières manifestations affectent les Terres Noires callovo-oxfordiennes dans lesquelles le remaniement de quartz bipyramidés (Demaison 1985) n'est possible que si les séries triasiques dont ils proviennent étaient exposées en fond de mer. Les secondes concernent l'Apto-Albien (Marnes Bleues). Elles se manifestent d'une part ; par des variations d'épaisseurs des séries entre les axes et les flancs des synclinaux, bien avant la tectonique pyrénéo-provençale, visibles dans les synclinaux de : Ste Jalle, Rosans, la Méouge et dans le synclinorium de Bourdeaux et d'autre part, ces variations d'épaisseur des marnes coïncident avec la localisation des chenaux turbiditiques et leurs biseaux sur les flancs des synclinaux. Il en va de même de l'organisation interne des slumps, qui témoignent de mouvements locaux transverses à la pente régionale du bassin. Des observations similaires semblent montrer que le même type de contrôle préside à la localisation des turbidites barrémo-bédouliennes. Au Tertiaire, seul le diapirisme est à même d'expliquer des mouvements verticaux dont l'amplitude (300m) en 250Ky excède les variations eustatiques connues au Burdigalien Sup.-Langhien. Ceci est manifeste autour de Vaison et dans la Massif des Angles près d'Avignon, dans ce dernier, le puits les Angles 1 a rencontré les évaporites à moins de 5000m ce qui implique qu'elles sont remontées d'autant et explique la profondeur des vallées incisées.

### 3.9.8 (o) New features of the crustal structure of the southwestern Alps unveiled by the CIFALPS experiment

Anne Paul<sup>1</sup>, Stéphane Guillot<sup>1</sup>, Liang Zhao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>Institute of Geology and Geophysics, Beijing, Chine

Most crustal-scale models of the western Alps rely on the results of the ECORS-CROP controlled-source seismic experiments, which were located in the NW part of the French-Italian Alps. Local earthquake tomography and gravity modelling were later used to constrain the only crustal-scale model proposed for the southwestern Alps. Moreover, the European Moho beneath the internal zone was not detected along the normal-incidence ECORS-CROP seismic line, and it could only be traced on wide-angle reflection data. To get direct constraints on the Moho geometry of the southwestern Alps, we initiated the CIFALPS

project (China-Italy-France Alps seismic survey), which is based on a temporary network of 55 broadband seismic stations installed for 14 months in 2012-2013. The core of the CIFALPS experiment is a profile of 46 stations with an interstation spacing of 5 to 10 km. The profile trends WSW-ENE from Bollène (Rhône valley, France) to the region of Alessandria (Po plain, Italy), crossing the axial part of the range in the Monviso - Dora Maira region. The experiment was designed to optimize the quality of crustal tomography, using mainly receiver functions in a first step. We computed ~2000 radial receiver functions, which were stacked in a common conversion point depth migrated section of the crustal structure. The European Moho is delineated by a strong P-to-S converted phase in the western part of the profile, which attenuates rapidly beneath the Briançonnais zone, and disappears beneath the Lanzo region. It dips eastward from ~25 km depth beneath the Rhône valley to ~33 km beneath the Vocotian basin, ~40 km beneath the Frontal Penininic Thrust and ~60 km beneath the Lanzo region where it disappears. The converted signal from the European Moho is strongly attenuated beneath the internal zone, as observed in the normal-incidence reflection section of ECORS-CROP. We conclude from this similarity that the European Moho is intrinsically different beneath the internal zone, possibly due to eclogitization. In the eastern part of the profile, the conversion on the Adriatic Moho is strong and very segmented, with vertical steps of a few km. A broad converted phase of negative polarity observed beneath the Dora Maira Massif might correspond to the contact between the lower part of the high-velocity Ivrea body and the European lower crust beneath it.

### 3.9.9 (o) Impact of glaciations and denudation on geodetic uplift and active faulting in the Alps : A rheological control ?

Jean Chéry<sup>1</sup>, Manon Genti<sup>1</sup>, Philippe Vernant<sup>1</sup>, Rodolphe Cattin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier

Normal faulting, uplift and low convergent rates are observed in the Western Alps. Until recently, occurrence of normal faulting in weakly convergent mountain ranges has been attributed to the conversion of potential energy of the topography into seismic motion in the upper crust and viscous flow in the lower crust. However, recent insights indicate that gravitational mountain collapse may not be the only process responsible for extension in the core of mountain belts : -1. Leveling and vertical GPS measurements show that the elevated topography of the western and central Alps is currently uplifted at rates of 1-2 mm/yr while gravitational collapse would lead to a downward motion ; -2. There is no correlation between mountain core extension and average mountain topography. Champagnac et al. (2009) have proposed an elastic plate model in which present-day uplift in the Alps occurs in response to mountain scale unloading by denudation. Following this first approach, we have developed a numerical model that demonstrates a causal link between topography denudation, crustal uplift and extensional strain in an alpine-type mountain belt (Vernant et al. 2013).

A key aspect of the seismotectonic field observations in the Alps is that seismic strain and geodetic uplift are occurring in relatively narrow areas, while our mechanical model predicts a broader uplift. Also, geodetic uplift rates appear to be larger than the maximum value associated to Holocene denudation rates. Using a 2D Finite Element Modelling, we explore the possibility that localized uplift may be associated to re-activation of pre-existing tectonic structures. These weak zones are accounted for using low frictional faults and/or low viscosity zones. We also investigate the possibility that large uplift rates may partly contain a rebound associated to Holocene deglaciations cycle.

### 3.9.10 (o) Topographic evolution of the Western Alps

Stéphane Guillot<sup>1</sup>, Matthias Bernet<sup>1</sup>, Séverine Fauquette<sup>2</sup>, Team Erd-Alps<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>ISEM, Montpellier

The topography of mountain belt is the result of the combined effects of deep tectonic and climatically modulated surface processes, which create the relief and wear down mountainous topography, respectively. Over the last two decades there has been growing awareness about the fact that tectonics, climate and surface processes are not operating independently, but through numerous interactions and feedback relationships. The topographic evolution of the Western Alps is evaluated in this study using Eocene to Late Pleistocene pollen data amalgamated with existing sedimentologic, petrologic and geo-thermochronological exhumation data. Thirty-two samples were analyzed from eight sites along two profiles from the pro-side to the retro-side foreland basins across the Western Alps. Microthermic tree pollen (mainly *Abies*, *Picea*) show that this mountain belt attained elevations over 1900 m as early as the Oligocene. Supposedly fairly rapid surface uplift during the mid-Oligocene coincided with a previously documented brief phase of rapid erosional exhumation, when maximum erosion rates may have reached values of up to 1.5-2 km/Ma. Slower long-term average exhumation rates on the order of 0.3 km/Ma since the Late Oligocene helped maintaining the high Alpine topography of the Western Alps until today. The pollen assemblages presented in this study indicate that the present-day asymmetric topography with a smoother western flank and steeper eastern flank was established early on in this orogen. This is based on the abundance of meso-microthermic tree pollen (*Cathaya*, *Cedrus* and *Tsuga*) and Microthermic tree pollen (*Abies*, *Picea*) in the pro- and retro-side foreland basin deposits. Therefore, the Western Alps were a high topography mountain belt over the past 30 Ma.

### 3.9.11 (o) Initiation et extension des drainages sud-alpins au cours de l'exhumation des Alpes occidentales

Anne-Sabine Grosjean<sup>1</sup>, Bernard Pittet<sup>2</sup>, Véronique Gardien<sup>2</sup>, Gweltaz Mahéo<sup>2</sup>, Philippe-Hervé Leloup<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LMV, Saint-Etienne

<sup>2</sup>LGLTPE, Lyon

En contexte orogénique, les réseaux de drainage sont les acteurs principaux de l'érosion des reliefs, du transport et de la redistribution des sédiments dans les bassins. Ils présentent deux orientations : 1) les rivières transverses, perpendiculaires au prisme orogénique, sont stables dans le temps et participent activement à son érosion ; 2) les rivières longitudinales sont capturées au cours de la propagation de la déformation et représentent des zones de transport et de dépôt dans l'avant-pays.

Les Alpes occidentales présentent une orientation actuelle N-S, dont la morphologie asymétrique, stable depuis l'Oligocène, est soulignée par une pente forte sur son flanc est et plus douce sur son flanc ouest. Des études récentes ont montré l'existence d'un réseau longitudinal dans le bassin d'avant-pays sud-alpin ; réseau actif à l'Oligo-Miocène enregistrant des apports détritiques provenant des Alpes internes et suggérant des drains transversaux actifs au cœur des massifs. Cependant, l'histoire tectonique complexe de formation des chaînes alpines induit encore des problèmes de compréhension quant à l'initiation et l'expansion de ce système de drainage régional.

De nouvelles données structurales et sédimentologiques sont ici associées aux données régionales existantes, afin de déterminer l'impact de

l'héritage topographique de la marge européenne sur la géométrie initiale du réseau dans l'avant-pays. La structuration tectonique N-S du bassin 1) a permis le maintien des zones de sédimentation au cours de l'extension transversale du réseau due l'exhumation des massifs alpins à l'Oligocène, et 2) explique la préservation des vallées longitudinales (aujourd'hui inactives) dans l'avant-pays au cœur de bassins en piggy-back. Nous avons finalement reconstruit l'évolution géographique de cet ancien réseau, dont les drains principaux correspondent, par comparaison à la situation actuelle, à la paléo-Durance et au paléo-Drac.

Cette étude a été supportée financièrement par l'Agence Nationale de la Recherche, Projet no. ANR-08-BLAN-0303-01 « Erosion et evolution du relief dans les Alpes occidentales ».

### 3.9.12 (o) Long-lasting transcurrent tectonics in SW Alps evidenced by Neogene to present-day stress fields, exhumation rates and geomorphology

Yann Rolland<sup>1</sup>, Victorien Bauve<sup>1</sup>, Romain Darnault<sup>2</sup>, Guillaume Sanchez<sup>1</sup>, Romain Plateaux<sup>3,1</sup>, Bruno Wilhelm<sup>4</sup>, Jade Petersen<sup>5</sup>, Carole Petit<sup>1</sup>, Marie Revel<sup>1</sup>, Nicole Bethoux<sup>1</sup>, Bertrand Delouis<sup>1</sup>, Régis Braucher<sup>5</sup>, Didier Bourlès<sup>5</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>2</sup>IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison

<sup>3</sup>Institute of Oceanography, Taipei, Taiwan

<sup>4</sup>University of Bern, Institute of Geological Sciences and Oeschger, Centre for Climate Change Research, Suisse

<sup>5</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

The SW Alps is an active orogen undergoing intra-mountainous extension and peripheral compression. The significance of the active deformation and its relationships with the long-term tectonics are still a matter of debate. Here, we propose a synthesis of recent works undertaken on : (1) long-term tectonics, based on thermochronology, structural analysis and paleo-stress derived from fault-slip data inversion ; (2) short term evolution based on cosmogenic nuclide exposure dating of geomorphologies and Holocene sedimentological record of Alpine lakes ; and, (3) present-day stress field obtained by the inversion of the focal mechanisms of the last 30-years seismicity.

The above data are consistent with a continuity of the tectonic regimes since the last 10 Ma (long term) to the present. Agreeing long-term and active tectonic regime stress states show that extension accompanies strike-slip and reverse faulting in the southern part of the belt. The extensional deformation regime is limited to specific tectonic domains that can be interpreted as 'transitional' between pure strike-slip segments where the deformation concentrates on inherited ductile shear zones that were formed 32 to 20 Ma ago. Thermochronology based on Fission Tracks and U-Th-He dates indicates a segmentation 8-5 Ma ago leading to differential uplift of blocks bounded by the strike-slip faults. The recent (quaternary) tectonic activity offset some geomorphologies shaped by glaciers, and is thought to influence the 0.5-2 mm.a-1 Quaternary uplift rates.

We thus propose that the ongoing extensional deformation in the SW Alps can be defined as a local deformation in a pull-apart type domain (High Durance - Jausiers area) or above slowly exhuming internal massifs (Dora Maira - Ivrea Body) along a curved boundary, which could be driven by the slowly rotating/reorganizing Apulian block and the relatively immobile Western Europe. The transcurrent fault system merges into a compressional front along the Mediterranean ? Ligurian coast mainly to the east of San Remo. Along this slow but still active fault system, significant ( $M > 6$ ) earthquakes recurrence of c. 500 years is suggested by Vens lake records (Homogenite levels).

### 3.9.13 (p) Permanent GPS network around the bend of the Jura Arc : preliminary results

Christian Sue<sup>1,2</sup>, Andrea Walpersdorf<sup>3</sup>, Pierre Sakic<sup>4</sup>, Mickael Rabin<sup>1</sup>, Jean Daniel Champagnac<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Chrono-Environnement, Besançon*

<sup>2</sup>*OSU THETA INSU, Besançon*

<sup>3</sup>*ISTerre, Grenoble*

<sup>4</sup>*LIENSs, La Rochelle*

<sup>5</sup>*ETH, Zurich, Suisse*

The Jura arc, the westernmost belt of the Alps, is one of the best-studied orogenic arcs in the world. The Jura is a typical fold-and-thrust belt, with a main décollement thrust localized in the Triassic evaporites. It is directly linked to the alpine orogenic wedge, especially in term of critical taper. It is supposed to be still active in collision mode, which would rise up the issue of its relation with the Alps to the East, currently undergoing post-orogenic GPA. Nevertheless, its current activity remains a matter of debate, few neotectonic-related data being available. The Jura is crosscut by left-lateral strike-slip faults in a radial scheme, and recent seismicity along one of them, the Vuache fault (MI 5.3 1996), and at the North of the belt (MI 5.1, 2004), argues for ongoing active deformation across the Jura Mountain. Here we present preliminary results of permanent GPS network surrounding the Jura belt (RENAG and RPG data), which tend to show very slow, yet self-consistent strain pattern of the order of some tenth of mm/yr over 100 km-long typical baselines, with shortening perpendicular to the arc, and extension parallel to its axial trend. We also characterize a slow uplift in the same order of magnitude, which appears to be correlated to the current uplift observed in the Alps. Indeed, the uplift velocities are continuously decreasing from the core of the Alps (+2 mm/yr) to the westernmost part of the Jura (+0,4 mm/yr) and to the stable foreland (-0.1 mm/yr). Actually, from the Po plain to the Jura foreland, the GPS-related uplift velocities are correlated to the topography, and the Jura arc appears connected to the Alps from this point of view. In order to better determine the deformation pattern in the Jura arc, we present a new regional GNSS permanent network (GPS-JURA, Besançon observatory) developed at the end of 2013, which will allow in a near future to accurately characterize and quantify the current strain pattern of this emblematic arc.

### 3.9.14 (p) Circulations de fluides multi-échelles au cours de l'orogénèse alpine, exemple des massifs du Mont Blanc et de l'Aar

Magali Rossi<sup>1</sup>, Yann Rolland<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*EDYTEM, Le Bourget du Lac cedex*

<sup>2</sup>*GEOAZUR, Sophia Antipolis*

L'analyse isotopique (O, C, H) et la datation <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar de minéraux formés dans les fentes alpines des massifs cristallins externes (Mont Blanc, Aar) ont permis de caractériser les échelles spatiales et temporelles des circulations de fluides au cours de l'orogénèse alpine. Les données géochronologiques indiquent une cristallisation progressive d'adulaire entre 16 et 9 Ma (essentiellement vers 11-12 Ma). Ainsi, les fluides hydrothermaux circulent et précipitent dans les veines pendant une période de 4 à 5 Ma qui succède au fonctionnement des zones de cisaillement. Les compositions isotopiques de l'oxygène des calcites et quartz hydrothermaux sont similaires à celles des roches encaissantes (roches cristallines non déformées et couverture méta-sédimentaire), ce qui suggère que les fluides hydrothermaux sont à l'équilibre isotopique avec leur encaissant. A contrario, les compositions isotopiques en carbone des calcites hydrothermales permettent de distinguer 3 groupes de veines. Les veines de type A sont tamponnées par les méta-sédiments

helvétiques. Elles se sont formées à partir d'un fluide riche en CO<sub>2</sub>, en système fermé (fluides locaux). Les veines de type C sont appauvries en <sup>13</sup>C, et ont des compositions isotopiques équivalentes à celles du CO<sub>2</sub> profond ou mantellique (système ouvert, fluides profonds). Les veines de type B ont des compositions isotopiques en carbone intermédiaires aux veines de type A et de type C, suggérant qu'elles se sont formées, en milieu ouvert, via un mélange de fluides locaux et profonds. Ces résultats indiquent que les fluides hydrothermaux ont circulé à une échelle crustale, voire lithosphérique, et sont remontés à travers la croûte continentale le long de grandes zones de cisaillement sub-verticales, associées au système décrochant situé le long du bloc Adriatique à partir de 20-16 Ma, permettant ainsi le mélange de fluides profonds et de fluides issus de la couverture sédimentaire des massifs cristallins externes.

### 3.9.15 (p) Detrital zircons in blueschist-facies meta-conglomerates : Implications for the Early Permian palaeo-topography of the Western Alps

Paola Manzotti<sup>1</sup>, Marc Poujol<sup>1</sup>, Michel Ballèvre<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Géosciences Rennes*

In the Western Alps, the Money Unit is a monocyclic unit, metamorphosed at blueschist facies during the Alpine cycle. It crops out as a tectonic window below the overthrust polydeformed, eclogite-bearing unit of the Gran Paradiso and its present position is the result of the Alpine tectonics. The Money Unit is considered to be Permo-Carboniferous in age, but no palaeontological or radiometric data constrain this interpretation. The Money unit exposes a sequence of clastic sediments and volcanics (Money Complex) that are intruded by a granitoid body (Erfault metagranite). In the Money Complex a polygenic (graphite-rich) and a monogenic (graphite-poor) meta-sedimentary formation have been recognized. The two sequences are separated by fine-grained biotite-amphibole gneisses, and by albite-bearing gneisses and amphibolites. Detrital zircon U-Pb geochronology in both meta-sedimentary formations shows that (i) the main population is Cambrian and Ordovician in age, (ii) the youngest grains are Silurian and Early Devonian, and (iii) Carboniferous zircons are lacking. A study of the age distributions in the Alps suggests that potential source for the detrital material in the Money Complex is the Briançonnais basement. Late Carboniferous magmatism is widespread in the Helvetic Zone of the Alps. Permian magmatism is dominant in the Briançonnais, in the Austroalpine, and in the Southern Alps. The lack of Carboniferous zircons in the Money Complex suggests that the detrital material did not derive from the erosion of the Helvetic Zone. The Helvetic Zone was separated from the Money basin by the Zone Houillère basin, where the main drainage pattern was developed from south to north and where the depocenters migrated northwards from the Namurian to the Stephanian. We suggest that the Money Complex may had been located to the east of the main river drainage inside the Zone Houillère basin or alternatively may represent a small basin, located on the east of the Zone Houillère.

### 3.9.16 (p) Morphostructural study of the Belledonne faults system (French Alps)

Jérémy Billant<sup>1</sup>, Olivier Bellier<sup>1</sup>, Jean-Claude Hippolyte<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*CEREGE, Aix-en-Provence*

The NE trending Belledonne faults system, located in the Alps, is a potentially active faults system that extends from the Aiguilles Rouges and Mont Blanc massifs in the NE to the Vercors massif in the SW (subalpine massifs). It includes the Belledonne border fault (BBF), defined by an alignment of micro earthquakes ( $M_L \leq 3,5$ ) along the eastern part of the Grésivaudan valley (Thouvenot et al., 2003). Focal mechanisms

and their respective depths tend to confirm a dextral strike slip faulting at crustal scale. In the scope of the Sigma (EDF, CEA, AREVA, ENEL) project, this study aims at better constraining the geometry, the kinematic and the seismogenic potential of the constitutive faults of the Belledonne faults system, by using a multidisciplinary approach that includes tectonics, geomorphology and geophysics. New clues of potential Quaternary deformations were observed : 1- right lateral offsets of morphologic markers (talwegs...) along the NE trending Arcalod and Jasneuf faults, consisting in the north-eastern and south-western terminations of the BBF respectively ; 2-the left lateral offset of the valley formed by the Isère glacier along the NW trending Brion fault which is consistent with the left-lateral kinematic deduced from the focal mechanisms. No morphological anomalies can be related to recent faulting along the BBF. However, fault kinematic analysis along strike the BBF allows to determine horizontal ENE trending and NNW trending of  $\sigma_1$  and  $\sigma_3$  stress axes respectively, which is consistent with the mean P and T axes deduced from the focal mechanism seismic events. Fault slip rates can not be strongly assessed because of the lack of morphologic features for which we can determine an age. Considering that the observed offset morphologies are inherited from the Würmian glaciation, the calculated fault slip rates are largely greater than the ones deduced for other French faults. So, it is likely that the studied morphologic markers are older than the Würm.

### 3.9.17 (p) Style of Alpine tectonic deformation in the Castellane fold-and-thrust belt, (SW Alps, France) : Insights from balanced cross-sections

Anthony Jourdon<sup>1</sup>, Yann Rolland<sup>1</sup>, Carole Petit<sup>1</sup>, Pierre Lanari<sup>1</sup>,  
 Nicolas Bellahsen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis  
<sup>2</sup>iSTeP, Paris

This study proposes a reappraisal of the role of the basement tectonics in the structuration of the Alpine foreland, across the Castellane fold-and-thrust belt located in southwestern Alps. We construct three 30 km length N-S balanced cross-sections across the entire fold-and-thrust belt, in order to quantify the amount of horizontal shortening due to the Pyrenean and Alpine deformations. We then assess the role of the basement inherited structures during the compressional phases which resulted in the exhumation of the Argentera-Mercantour External crystalline massif and the Barrot Dome. The construction of these balanced cross-sections suggests a dominant thick-skinned deformation style, which includes the reactivation of inherited Permian and Early Cretaceous basement normal faults. We reconstructed three restoration stages : the oldest one highlights the geometry of Permian and Early Cretaceous extensional structures ; the intermediate one after the Late Cretaceous evidences a first compressional episode linked to the Pyrenean compression ; the latest one in the Oligocene shows the first Alpine folds resulting from the southward thrusting of the internal units over the external ones along of the Penninic Frontal Thrust. Balanced cross-sections suggest very moderate crystalline basement - sedimentary cover decoupling. On the western and central cross-sections, the estimated amount of shortening ranges from 9.5 to 10 km (21%) whereas on the easternmost one shows ~5 km of shortening (9%). These shortening values are consistent with previously published estimates in the surrounding foreland subalpine chains. They highlight a decreasing value of Pyrenean shortening towards the east, while the Alpine shortening dominates and amplifies this first phase in a similar direction. We interpret this dominantly thick-skinned structural style as a possible consequence of the Neogene thermal weakening in the European passive margin above the Ligurian slab rollback.

### 3.9.18 (p) Evolution des systèmes de circulation de fluides dans les Massifs Cristallins Externes alpins et leur couverture

Alexandre Boutoux<sup>1</sup>, Anne Verlaquet<sup>1</sup>, Nicolas Bellahsen<sup>1</sup>, Olivier Lacombe<sup>1</sup>, Benoit Villemant<sup>1</sup>, Benoit Caron<sup>1</sup>, Erwan Martin<sup>1</sup>, Nelly Assayag<sup>2</sup>, Pierre Cartigny<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris  
<sup>2</sup>IPG Paris

L'évolution des systèmes de circulation des fluides métamorphiques en fonction du taux de raccourcissement collisionnel est un paramètre clé pour mieux comprendre les premiers stades de l'évolution rhéologique d'une croûte lors de sa collision mais il est pourtant encore mal contraint.

La marge proximale européenne (Massifs Cristallins Externes (MCE) et leur couverture), enfouie à mi croûte sous les unités internes lors de la collision alpine, a été affectée par un raccourcissement « thick-skinned ». Cette déformation se caractérise par de grandes bandes de cisaillement déformant le socle des bassins hérités qui se propage (e.g. Mont Blanc) ou non (e.g. Oisans) dans la couverture. C'est dans la couverture du massif de l'Oisans, que l'on tente de caractériser l'évolution des circulations de fluides à l'interface socle-couverture. L'étude isotopique (d18O-d13C) des veines de la couverture des bassins et leur observation en cathodoluminescence suggèrent que le remplissage des veines se fait localement via les réactions progrades de déshydratation. Cependant, on observe à l'aplomb de certaines zones de cisaillement du socle des concentrations anormales en Ni et Cr, éléments caractéristiques du socle déformé sous-jacent. Son étude pétrologique (MEB) montre que Ni et Cr sont contenus dans la paragenèse hercynienne dont les phases ont été déstabilisées lors du cisaillement alpin. Cette étude met donc en évidence des circulations très limitées de fluides de socle, percolant sur de faibles distances dans la couverture depuis l'initiation du raccourcissement du bassin.

L'Oisans ayant été moins raccourci que les MCE situés plus au Nord, il semble donc clair que l'ouverture à grande échelle des systèmes de circulations de fluides entre socle et couverture est due à l'augmentation du taux de raccourcissement de la croûte.

### 3.9.19 (p) On the Oligo-Miocene convergence of Adria as recorded from collisional shortening

Claudio Rosenberg<sup>1</sup>, Nicolas Bellahsen<sup>1</sup>, Frédéric Mouthereau<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

Present-day interpretations of GPS data suggest that the the northern part of the Adriatic Plate moves according to a counter-clockwise rotation around a pole located in the Po plain, at the margin of the Western Alps. Recent reconstructions of the collisional convergence history suggest a WNW-oriented movement associated with 100 km (Schmid and Kissling, 2000) or 243 km (Handy et al., 2010) of collisional shortening (since 35 Ma) in the Western Alps. We discuss these models by reevaluating the mechanisms of long-term accommodation of the Adria plate convergence using a comparison of the amounts of collisional shortening recalculated in the Western and in the Central segment of the Alps. Our results suggest that the initiation of collision in the early Oligocene is not associated with large changes in the convergence direction, as invoked by previous plate kinematic models. In contrast to previous calculations, our approach does not assume a priori the amount of right-lateral displacement accommodated along the Insubric Line during collision, but it allows us to constrain it based on shortening estimates in different directions. These suggest a dextral offset significantly smaller than in previous studies. This new interpretation is consistent with

a more continuous plate convergence direction from the Cretaceous to the upper Miocene, with larger amounts of collisional shortening in the Central Alps compared to the western Alps, with the absence of HT metamorphism in the western Alps, and with the E-W strike of the fold and thrust belts that accommodate the largest amounts of collisional shortening in the Southern and Central Alps.

### 3.9.20 (p) Collision et inversion de bassins extensifs hérités : Influence de l'enfouissement tectonique et exemple des zones externes des Alpes de l'Ouest

Manfred Lafosse<sup>1</sup>, Alexandre Boutoux<sup>1</sup>, Nicolas Bellahsen<sup>1</sup>, Laetitia Le Pourhiet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

Lors de la collision, la marge de l'océan précédemment subducté se trouve raccourcie. Celle-ci est affectée de nombreuses hétérogénéités dont les failles normales, les bassins syn-rift associés et les structures héritées du cycle orogénique précédent. L'effet affaiblissant des failles héritées et donc leur effet sur la cinématique et la mécanique de la croûte sont encore mal compris. En particulier, il a été suggéré que lors d'un enfouissement tectonique significatif, la réactivation des failles normales est inhibée. Nous avons donc construit des modèles numériques thermo-mécaniques d'une croûte de rhéologie classique, comportant des bassins syn-rift hérités avec une viscosité plus faible et soumise à un raccourcissement. Sur ces modèles, on a mené une étude paramétrique de la friction des failles héritées et de l'enfouissement tectonique. Nous montrons que la présence d'un bassin hérité localise la déformation de la marge qui se caractérise par un plissement à l'échelle crustale du socle, localisé sous le bassin. De plus, même en considérant une faible friction ( $\mu=0,1$ ) pour la faille normale, celle-ci est peu réactivée lorsque l'enfouissement tectonique atteint quelques kilomètres. La faille, du fait du plissement de socle, est progressivement redressée et sa réactivation d'autant plus inhibée. Enfin, la présence du bassin favorise la localisation le cisaillement de la base de la séquence syn-rift. Ces résultats sont amplifiés par l'augmentation de l'épaisseur l'enfouissement. On compare ensuite ces résultats aux zones externes des Alpes de l'Ouest, sur une section à la latitude du bassin de Valence et du massif de l'Oisans. Il apparaît que la géométrie de la marge ne peut être expliquée uniquement par l'inversion des failles normales. C'est sans doute la présence des unités internes alpines épaisses de plusieurs kilomètres et charriée vers l'Ouest sur la zone externe qui a induit l'inversion des bassins sans inversion des failles normales.

## 3.10 Evolution des fronts de chaînes

### (Foothills evolution)

#### Responsables :

- Patrice Baby (GET, Pérou)  
patrice.baby@get.obs-mip.fr
- Stéphane Brusset (GET, Toulouse)  
stephane.brusset@get.obs-mip.fr
- Jean-Claude Ringenbach (Total, Pau)  
jean-claude.ringenbach@total.com>
- Jean-Paul Callot (LFC-R, Pau)  
jean-paul.callot@univ-pau.fr
- William Sassi (IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison)  
william.sassi@ifpen.fr

#### Résumé :

L'objectif de cette session est de montrer les avancées réalisées ces dernières années dans le domaine de l'analyse géométrique et cinématique de la déformation des fronts de chaînes, en s'appuyant sur divers cas d'études à travers le monde. On portera une attention particulière à la construction de coupes équilibrées couplée à l'outil de thermochronologie basse température, qui permet de proposer des restaurations séquentielles de la déformation, et de contraindre l'histoire des mouvements verticaux associés aux processus complexes d'enfouissement sédimentaire et de soulèvement tectonique. Ce type de reconstitution conditionne l'élaboration de nouveaux concepts dans l'analyse des bassins sédimentaires d'avant-pays et la caractérisation de leurs systèmes pétroliers. Les cas d'étude s'appuyant sur une collaboration de recherche industrielle dans des zones en cours d'exploration seront particulièrement appréciés.

#### Abstract :

The aim of this session is to exhibit recent ground-breaking research into the geometric, kinematics and geomechanics of frontal thrust-wedge. Study cases mixing thermal evolution and balancing techniques are welcome, as well as robustly-calibrated sequential restoration including burial and uplift histories providing uplift rates, which may help in defining new concepts for foreland basin systems analysis. Both academic and industrial funded work in current exploration projects will be strongly appreciated

#### Resumen :

En esta sesión se tratara de mostrar los elementos recientes en la investigación en términos de geometría, cinemática y geomecánica de los prismas orogénicos frontales. Estudios mezclando técnicas de balanceo y evolución térmica serán bienvenidos, así como, restauraciones secuenciales que permiten una reconstrucción del enteramiento y del levantamiento. Esos datos deberían permitir de proponer nuevos conceptos para el análisis de los sistemas de cuenca de ante-país. Trabajos académicos y industriales que presentan actuales proyectos de exploración serán muy valorados.

### 3.10.1 *Keynote communication* : Foothills : drilling blind, side-tracking and struggling with seismic

Jean-Claude Ringenbach<sup>1</sup>, Jean-François Ballard<sup>1</sup>, Francis Clément<sup>1</sup>,  
 Constantin Géré<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

Fold-and-thrust-belts still host a significant exploration potential, in the range of 15-20% of the global Yet-to-Find. As illustrated by a Bolivian example in the Subandean domain, block evaluation and selection rely on an integrated multi-disciplinary regional approach. Exploration and delineation require a good cooperation between driller and geologist to steer the well toward the target using paleontology and dipmeter interpretation. In this case the reservoir is highly deformed inside a complex detachment fold, where seismic imagery is poor (sparse 3D). Delineation is as tricky as exploration and side-tracks are part of the game.

In Subandean domains, seismic, either 2D or 3D, is sometimes successful, sometimes fails. Structural complexity of the trap is not the only parameter to consider. Near surface complexity plays a very important role, as it controls the signal to noise ratio of the seismic image.

The hunt for sub-thrust plays requires a fair seismic image of the trap, when it is not coaxial to the surface folds. When original seismic data are not too much contaminated by noise, multifocusing/CRS approaches can help to determine the most appropriate well trajectory.

Altogether, exploring FTBs requires skilled structural geologists with a long experience in the area and the full integration of existing data as well as conventional and non conventional geophysical data. In the absence of seismic imaging breakthrough (with the help of accurate 3D full wave modelling to optimize seismic design) like what happened in the deep offshore sub-salt domains, it will remain a risky business.

### 3.10.2 (o) The southern marañon basin : A fore-deep wedge-top transition zone inherited from pre-cretaceous compressional and extensional structures

Ysabel Calderon<sup>1</sup>, Patrice Baby<sup>2</sup>, Gérôme Calves<sup>3</sup>, Adrien Eude<sup>3</sup>,  
 Stéphane Brusset<sup>3</sup>, Rolando Bolaños<sup>1</sup>, Elmer Martinez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PERUPETRO, Pérou

<sup>2</sup>Institut de Recherche pour le Développement, Lima, Pérou

<sup>3</sup>GET, Toulouse

The Marañon and Huallaga Subandean basins located in the Andean-Amazonian transitional area are classically interpreted as the components of a foreland basin system, where the Huallaga Subandean area is correlated to the wedge-top depozone and the Marañon area to the foredeep depozone. In this study, the present day structural architecture of the southern Marañon basin and its relationship with pre-Cretaceous contractional and/or extensional structures are revised based on the exhaustive compilation of seismic and well data. We show that the southern Marañon basin corresponds to an incipient wedge-top depozone deformed by the propagation of a Subandean thick-skinned tectonics, which affects the entire Cenozoic series and dies progressively to the north where the foredeep depozone is preserved. Development of these modern structures has been profoundly influenced by the inherited structures from the Late Permian « Jurua » orogeny and the Triassic rifting. Late Permian structures have N-S orientation and correspond to west-verging thrusts. Some of these late Permian structures are reactivated during Andean deformation or cut by Subandean east-verging thrusts. Both systems branch to the same intra-basement décollement.

Preserved Late Permian folds have probably a strong potential for hydrocarbon entrapment. In the south Marañon basin, the Triassic rift system filled by the Mitu Formation is NNE-SSW oriented and comparable to the Triassic rift system of the Oriente basin of Ecuador. It is partially inverted during the Late Cenozoic. The inversion of the eastern border of the Mitu rift constitutes a transfer zone between the Marañon and Ucayali basins.

### 3.10.3 (o) Microtectonic record of the strain pattern in the Malargüe fold and thrust belt using fractures analysis and ASM data

Matthieu Branellec<sup>1</sup>, Jean-Paul Callot<sup>1</sup>, Charles Aubourg<sup>1</sup>, Bertrand Nivière<sup>1</sup>, Jean-Claude Ringenbach<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LFC-R

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

In fold-and-thrust belt setting (FTB), the tectonic history and the spatiotemporal evolution of kinematics are fundamental to understand how both stress and strain affect sedimentary and basement rocks. Several tools allow analysing paleostress/strain at different scales. This work deals with the Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) and fracture network. AMS tool provides information about the microscopic preferred orientation of billions of magnetic grains in response to deformation. Fracture network yield insights on the stress build-up at regional scale and can be considered as a good proxy of mesoscale deformation. The Neuquén Basin is a wide intracratonic evolving behind the Andes. The Pacific subduction and south Atlantic opening were the mechanisms controlling the far-field stresses in the basin. By Late Triassic times, continental scale extension initiated fault-related narrow rift depocenters which later evolved toward a sag basin from Middle Jurassic to Late Cretaceous. At that time, the basin recorded the onset of a compressive stress regime in the back arc domain.

AMS measurements were performed on 306 samples collected from 30 sites in terrigenous rocks located along three cross-sections from the hinterland to the foreland in the Malargüe FTB (northern Neuquén Basin). In addition, 2000 fractures were measured in various locations and stratigraphic levels. The spatiotemporal pattern of AMS data and the fracture network characterization at regional scale helps to unravel the foreland building history and to understand strain distribution. The results show that the deformation is compartmentalized and that the foreland construction is polyphased and closely related to structural inheritance.

### 3.10.4 (o) Cinématique et Géométrie structurale de l'Atlas sud tunisien

Aymen Said<sup>1</sup>, Patrice Baby<sup>2</sup>, Dominique Chardon<sup>3</sup>, Jamel Ouali<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Simula Research Laboratory, Lysaker, Norvège

<sup>2</sup>IRD, Marseille

<sup>3</sup>GET, Toulouse

<sup>4</sup>Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Sfax, Tunisie

Une analyse structurale de l'Atlas sud tunisien a été menée en utilisant des observations de terrain, de l'interprétation sismique et la construction de coupes équilibrées. Les résultats montrent l'existence à la fois de structures chevauchantes de types « thin skinned » et « thick skinned ». Une variation latérale qualitative et quantitative de la déformation régionale contrôlée par des rampes obliques NO-SE a été également soulignée. Cette étude confirme le rôle de l'héritage structural associé au rifting du Trias supérieur-Jurassique inférieur dans la structuration de l'Atlas sud tunisien et de son bassin d'avant-pays. Le patron structural

du Trias supérieur-Jurassique inférieur est caractérisé par une prédominance de failles normales NO-SE à regard NE et de failles normales E-O limitant des bassins losangiques. Ces failles ont été inversées dans un premier temps pendant le Turonien moyen-Maastrichtien inférieur. Cette première inversion peut être corrélée à l'initiation de la subduction de la Téthys sous l'Eurasie. Le raccourcissement majeur de l'Atlas sud tunisien a commencé au Serravallien-Tortonien et est encore actif. La déformation du système chevauchant d'avant-pays s'est propagée durant cette période sur le niveau de décollement formé par les évaporites du Trias supérieur-Jurassique inférieur. La « phase atlasique » d'âge éocène décrite en Algérie et à l'Est de la Tunisie ne semble pas s'exprimer clairement dans l'Atlas sud tunisien, qui correspondait probablement, durant cette période, au « backbulge » du système d'avant-pays atlasique. Pendant l'Oligocène-Miocène moyen, correspondant à des séries condensées dans la région étudiée, l'Atlas sud tunisien coïncidait probablement avec le « forebulge » du système d'avant-pays. Ceci est en accord avec la subsidence générale oligocène-miocène inférieure décrite dans la partie septentrionale de l'Atlas tunisien.

### 3.10.5 (o) Zagros fold belt : orogenic accretion from obduction to collision

Jaume Vergès<sup>1</sup>, Eduard Saura<sup>1</sup>, Emilio Casciello<sup>1</sup>, Manel Fernandez<sup>1</sup>, Daniel Garcia-Castellanos<sup>1</sup>, Ivone Jiménez-Munt<sup>1</sup>, Montserrat Torne<sup>1</sup>, Antonio Villaseñor<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Group of Dynamics of the Lithosphere (GDL), Institute of Earth Sciences Jaume Almera, Barcelona, Spain

The Zagros orogenic system comprises an exceptionally wide deformation zone between Arabia and Eurasia, embracing the entire Iran, and resulting from the closure of the Neotethys Ocean through its protracted NE-dipping subduction beneath Eurasia. The ~2000-km long, NW-SE trending Mesopotamian basin and Zagros fold belt (deformed basement and cover of the Arabian lower plate) are at the front of this orogenic system formed by the Sanandaj-Sirjan Zone and the Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc, parallel tectonic domains belonging to the upper plate. The Zagros fold belt deforms 10-12-km thick Arabian sedimentary cover, which records compressive deformation since Late Cretaceous times. These tectonic events and their sequence have been studied in great detail in the last ten years, mainly due to the profusion of dating of the syntectonic marine and non-marine sediments in the fold belt and foreland basin. Despite these new data, and taking in account that there is a general consensus that the Zagros orogeny occurred during the complete consumption of the Neotethys Ocean, tectonic interpretations differ and ages of major geodynamic events remain controversial.

Our studies confirm that the early Amiran foreland basin depocenter migrated from Campanian to Eocene (c. 83-52.7 Ma) after the onset of young Tethyan intra-oceanic obduction on top of the Arabian plate margin at the Cenomanian-Turonian boundary (~93 Ma). This migration is coeval with a mild but far-reaching deformation as indicated by punctuated growth strata deposits. A younger deformation event shaped the present geometry of the magnificent Zagros fold belt, strongly overprinting the previous phase. Deformation along the High Zagros Fault was active from 20 Ma to at least 7.5 Ma. Folding in the Lurestan was active from at least ~13.5 Ma in the NE, migrating to the SW where it possibly terminated at about 2.5-1.5 Ma. In the Fars, deformation onset is dated at 14.5 Ma migrating SW-wards to the Persian Gulf coastline where the folds are still active.

We propose a simple 2D kinematic model accounting for the existing Arabia-Eurasia plate tectonic convergence models and constrained by the well-calibrated deformation periods from both Amiran and Mesopotamian foreland basins to characterize the crustal accretion shaping the widespread Arabia-Eurasia collisional domain.

### 3.10.6 (o) Fold-and-Thrust Belts on salt - Salt Tectonics in a Fold-and-Thrust Belt (Sivas, Turkey)

Jean-Claude Ringenbach<sup>1</sup>, Jean-Paul Callot<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>2</sup>LFC-R, Pau

Salt is a very efficient detachment in fold-and-thrust belts. It has a very low shear resistance and produces wide fold belts with low taper, characterized by long detachment folds. These belts do not follow the classical in-sequence propagation of a Coulomb tectonic wedges developed over stronger detachments, such as the Rocky Mountains. Examples from Zagros and Tajikistan among others will illustrate the salt controlled thin-skinned style, and how late basement involvement can interfere with the thin-skinned belt.

In most salt related fold-and-thrust belts, like in most salt provinces, salt tectonics has occurred before compression, very early in the basin evolution. In Zagros, only the latest part of the salt story, squeezed cylindrical passive diapirs, can be observed, although halokinesis is known to have started as early as Cambrian. In the southeastern Alps, evaporites have disappeared, however paleo-diapirs, welds and megafolds can be deciphered. The resulting fold and thrust belt thus builds up at the expenses of preexisting salt related structures.

In the recently revisited Sivas Basin in Turkey, thick evaporites structures are preserved. The basin lies over the Neotethyan suture. A thick evaporite layer deposited in Middle Oligocene likely in an extensive to transtensive setting. During the following tectonically quiet period, fluvial sediments filled up mini basins. They continued their evolution while compression strongly resumed from Early to Middle Miocene. A second phase of mini basins formed after this compression and salt tectonics is still active at some locations.

Classical salt basins on passive margins (e.g. Gulf of Mexico, West African Margin) formed in a tectonically quiet deep offshore setting and are filled with turbidites. Sivas Basin evolved in a very different setting, convergent tectonic context and fluvial to shallow marine sedimentary environment. However, the mini basin structures exposed in Sivas can be directly compared to seismic images from offshore basins. Structures like salt walls and sheets, welds, halokinetic sequences and mega flaps will be illustrated and compared with similar structure on high quality seismic data.

### 3.10.7 (o) Structure and exhumation of the north-Peruvian forearc system inferred from balanced cross sections and apatite fission track data

Nicolas Espurt<sup>1</sup>, Stéphane Brusset<sup>2</sup>, Patrice Baby<sup>2</sup>, Martin Roddaz<sup>2</sup>, Mayssa Vega<sup>3</sup>, Ysabel Calderon<sup>3</sup>, Rolando Bolaños<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>GET, Toulouse

<sup>3</sup>PERUPETRO, Lima, Pérou

Forearc systems represent complex and challenging domains for future hydrocarbon exploration. The north-Peruvian forearc belongs on the western flank of the northern Andes. This tectonically active forearc system, related to the post-Jurassic geodynamics of the Nazca and South American convergence plate system, consists of three main Mesozoic to Cenozoic depocenters : the Tumbes, Talara and Lancones sub-basins. Contrary to other forearc areas of the Andean orogen, this forearc includes a giant petroleum province : the Talara sub-basin. However, the petroleum system of this forearc still remains poorly understood, and the offshore areas of the Tumbes sub-basin are under-explored. As well,

it is an ideal region to study the Cenozoic tectonic evolution of a fore-arc system in terms of large-scale structure and reconstruction of different stages of deformation and exhumation. Surface and seismic reflection data together with the construction of two  $\sim 200$  km-long balanced cross sections show that the structure of the forearc is dominated by successive thrust systems culminations (Banco Peru, Zorritos, Carpitas and Amotape) which delimit extensional depocenters with gravitational sliding, sustained by high sedimentation rates. New apatite fission track data show that the exhumation of the internal forearc zone started in Miocene. This exhumation was driven by the growth of imbricate thrust systems underneath the Lancones and Talara sub-basins, which favored erosion and high sediment supply regime from the continent toward the offshore Tumbes sub-basin. Post-Miocene to present-day growth of the frontal Banco Peru accretionary wedge structurally contributes to strong sedimentary accumulation (up to  $\sim 8$  km) in the Tumbes sub-basin, controlling thermal evolution and hydrocarbon generation.

### 3.10.8 (o) Tectonic inheritance control on exhumation and deformation of the Eastern Cordillera and Subandean zone in North Peru (5-8°S), using Thermochronology and Balanced Cross-Section

Adrien Eude<sup>1</sup>, Martin Roddaz<sup>1</sup>, Stéphanie Brichau<sup>2</sup>, Stéphane Brusset<sup>1</sup>, Ysabel Calderon<sup>3</sup>, Patrice Baby<sup>4</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>IRD, Marseille

<sup>3</sup>PERUPETRO, Lima, Pérou

<sup>4</sup>IRD, Lima, Pérou

In the Andes, precise knowledge of deformation and exhumation timing in Eastern Cordillera (EC) and Subandean Zone (SAZ) is fundamental to understand mechanisms responsible for mountain growth and decipher the respective role of tectonic activity and climate forcing in shaping topography. In this study, we report a 500 km balanced cross section constructed according to surface and subsurface data, apatite fission-track (AFT) and (U-Th)/He (AHe) ages and vitrinite reflectance (Ro) values from northern Peruvian EC and SAZ. The balanced cross section shows that the structural architecture is composed by thick skinned thrust related to the inversion of the Triassic rift normal faults and reactivation of Late Permian thrust faults. The SAZ is characterized by a combination of thick and thin skinned tectonics. The total amount of shortening calculated from the balanced cross-section is 142 km (i.e.,  $\sim 28\%$ ). AFT and AHe ages indicate that exhumation timing in EC and SAZ is coeval and occurred between ca 17 Ma and 8 Ma. Sequential restoration calibrated by AFT, AHe and Ro data reveals that shortening rates vary from 7.1 mm.yr<sup>-1</sup> to 3.6 mm.yr<sup>-1</sup> between 17-8 Ma and 8-0 Ma, respectively. Considering these results for the first  $\sim 49$  km of horizontal shortening, we propose that the transfer of the Andean into the EC and SAZ started between 30 and 24 Ma. Active deformation recorded by seismic activity in the Marañon foredeep argues for a forward propagation of the Andean shortening. We suggest that tectonic deformation style is the main mechanism controlling Andean erosion and exhumation in relation with inherited basement structures. This tectonic inheritance control is still on going with reactivations of Permian faults in Marañon foredeep promoting forward propagation and maintaining the Eastern Andean Peruvian wedge in a supercritical state.

### 3.10.9 (o) Géométrie et Cinématique de la déformation de la Cordillère Orientale et de la zone subandine du Sud Pérou

Mélanie Louterbach<sup>1</sup>, Patrice Baby<sup>1</sup>, Willy Gil<sup>2</sup>, Alejandro Quispe<sup>3</sup>, Stéphane Brusset<sup>1</sup>, Stéphanie Brichau<sup>1</sup>, Martin Roddaz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Repsol, Madrid, Espagne

<sup>3</sup>PERUPETRO, Lima, Pérou

La chronologie de la déformation des Andes Centrales, particulièrement la cordillère Orientale (EC) et la zone Subandine (SAZ), est encore controversée et débattue de nos jours. Les principales problématiques scientifiques liées à l'orogénèse Andine sont liées aux processus de création de reliefs, à la géométrie de la déformation et au timing général de mise en place de ces structures andines. À ces problématiques s'ajoute une composante économique, aux vues des importants gisements et prospects pétroliers découverts et étudiés dans les zones Subandines depuis le Venezuela jusqu'en Bolivie. A partir d'une étude multidisciplinaire sur deux transects Cordillère Orientale-zone subandine du Sud Pérou (analyse structurale de terrain, coupe équilibrée, thermochronologie (Traces de Fissions sur Apatites et (U-Th)/He sur Apatite), biostratigraphie, analyse de strates de croissance, interprétations sismiques), notre étude met en évidence deux périodes de déformation : i) depuis la fin de l'Oligocène jusqu'au Miocène Moyen ( $\sim 25$ -14 Ma, Période 1), et ii) pendant le Miocène supérieur jusqu'au Pléistocène (10-2.8 Ma, Période 2). Outre les implications pour l'exploration pétrolière, nos résultats indiquent que l'érosion de la Cordillère Orientale du Sud Pérou n'est pas contrôlée par un changement climatique (Lease et Elhers 2013), mais plutôt par le développement de duplex au front des Andes. Ces nouvelles données ont des implications directes pour deux des plus importants problèmes fondamentaux en géologie Andine, à savoir : i) l'effet supposé du contrôle climatique Pliocène sur l'érosion ; ii) le transfert du raccourcissement Andin depuis l'Altiplano vers la zone Subandine depuis  $\sim 25$  Ma. Ce dernier point suggère que le soulèvement de l'Altiplano est un processus lent, résultant de la combinaison possible des processus d'épaississement crustal et de circulation de la croûte inférieure.

### 3.10.10 (o) On the structure of the Tajik Depression (western foreland of the Pamir) and the problem of the amount of convergence between the Pamir and the Asian Plate

Lukasz Gagala<sup>1,2</sup>, Jean-Claude Ringenbach<sup>3</sup>, Lothar Ratschbacher<sup>2</sup>, Alexandra Kässner<sup>2</sup>, Sanaa Abdulhameed<sup>2</sup>, Adam Szulc<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>Georex, France

<sup>2</sup>Technische Universität Bergakademie, Freiberg, Allemagne

<sup>3</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>4</sup>Cambridge Arctic Shelf Programme, Cambridge, Royaume-Uni

The Tajik Depression is the westernmost and widest part of the Neogene-Recent foreland basin of the Pamir. It is confined between the Pamir, Tien Shan and Ghissar mountain belts. In the Neogene, the Cretaceous-Recent fill of the Tajik Depression was detached along Late Jurassic evaporites, folded and thrust towards the W-NW in front of the advancing Pamir.

The structural interpretation is based on a series of balanced cross-sections tied to field observations and new seismic data. The cross-sections show how thin-skinned folds and thrust sheets interact with thick-skinned structures in the basement. The western (foreland) part

of the thin-skinned system features thrust sheets stacked along back-thrusts that accommodated large displacements, up to ~20 km in the extreme case. The eastern (hinterland) part accommodated less shortening and is characterized by thrust detachment folds. The thick-skinned belts that surround the Tajik Depression originated from reactivation of pre-existing structures (Tien Shan) and recent thick-skinned thrusting (Ghissar).

According to our new AFT and (U-Th)/He constraints, folding in the Tajik Depression started at ~13 Ma and was largely completed by ~4 Ma, although the area is still tectonically active. The succession of deformation reveals a non-Coulomb behavior of the thin-skinned belt and a control imposed by the surrounding thick-skinned structure.

The amount of thin-skinned shortening first increases from ~89.4 km in the south to ~117.8 km in the centre, but drastically drops to ~16.4-7.8 km in the northwestern and northern sectors of the Depression. These low shortening estimates represent a challenge for the palinspastic restoration. To sustain the commonly accepted ~300 km of convergence between the Pamir and the Asian Plate one has to accept stationary, erosional front of the thin-skinned system in the northwestern and northern parts of the Tajik Depression.

This research was conducted under the patronage of Total®.

### 3.10.11 (o) Geomorphological signature of the Pleistocene thin-skinned tectonics in the northern Maturín Foreland Basin, Eastern Venezuela

Atiria Fajardo<sup>1</sup>, Roberto Wagner<sup>2</sup>, Bertrand Nivière<sup>3</sup>, Vincent Regard<sup>4</sup>, Charles Aubourg<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Intevep, PDVSA, Caracas, Venezuela*

<sup>2</sup>*TOTAL, Paris-La Défense*

<sup>3</sup>*LFC-R, Pau*

<sup>4</sup>*GET, Toulouse*

The Eastern Venezuela Basin was deformed as a consequence of the oblique collision between Caribbean and South American plates. These efforts led to the growth of the Serranía del Interior fold-thrust-belt and its foreland basin. This foreland basin is divided into the Guárico sub-basin in the west and the Maturín sub-basin in the east. The Maturín sub-basin is geologically well known due to geological survey and structural-stratigraphic modeling motivated by the hydrocarbon exploration. We focus here on Plio-Pleistocene deformations of the area that remain poorly understood.

The study area stands on the northern edge of the Maturín sub-basin, in an area limited by the foothills of the Serranía del Interior to the north, and by the right lateral crustal Urica and San Francisco Faults to the west and east respectively. Between them, from the mountain to the deformation front, the thin-skinned tectonic wedge is mainly structured above the Pirital and Quiriquire thrust faults.

We demonstrate that the Maturín sub-basin remains an area of active continental shortening in which a post-Pliocene surface has been deformed by folds, which are developed above buried reverse faults. Cosmogenic dating of folded surfaces allows a quantification of slip rates. Even if seismic lines show that superficial deformations are not systematically connected to fault in depth, these deformations suggest that the crustal Urica and San Francisco faults are still active. So, contrarily to GPS measurements, these faults could accommodate a small part of the displacement between South American and Caribbean plates.

### 3.10.12 (o) Geomorphology of the Northern Great Caucasus : investigating depth geometries from surface data

Bertrand Nivière<sup>1</sup>, Jean-Paul Callot<sup>1</sup>, Jean-Claude Ringenbach<sup>1</sup>,  
Lukasz Gagala<sup>3</sup>, Vincent Regard<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*LFC-R, Pau*

<sup>2</sup>*TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau*

<sup>3</sup>*Georex, Argenteuil*

<sup>4</sup>*GET, Toulouse*

The Greater Caucasus are forms the northernmost extent of the Arabia-Eurasia collision and are thought to represent the main locus of shortening within the central portion of the collision zone between 40° and 48°E. Recent work suggests that in details, since the Plio-Pleistocene, much of the shortening in the eastern portion of the Greater Caucasus system has been focused within the Kura fold-thrust belt located along the south-eastern margin of the Greater Caucasus. We focus here on the northern margin of the orogen.

Based on field and satellite image analysis, we here present new mapping and morphologic investigations of the eastern termination of the Greater Caucasus in Azerbaijan, in a foothills area where structural markers are lacking. We better constrain the structural geometries, magnitude of shortening, and initiation age for this portion of the fold-thrust belt.

Our work suggests that this area exhibits significant along-strike variations in structural style and evolution and can effectively be divided as its northern flank into two distinct domains at ±49°E. The eastern on going domain is characterized by a back thrust facing the mountain front whereas the western domain is characterized by a subcritical median surface slope related to classic forelandward thrust propagation.

Our work shows that subsurface morphological markers as fluvial and marine remnant terraces and surface remnant of the former foreland, mimics structural geometries observed at depth on published seismic profiles. Dating of these markers allow a quantification of shortening rates. Comparison of these average shortening rates to the geodetically measured shortening rate of 8 mm/yr will indicate the part of convergence accommodated by the northern domain of the Greater Caucasus at this longitude.

### 3.10.13 (o) Relations tectono-sédimentaire des unités sous numidiennes (Kasseb et Ed Diss) et numidienne : l'écaille Eocène de Sidi Yousef des monts de Bou Heurtma, lambeau de poussé et preuve de l'allochtonie du flysch numidien. (Tunisie septentrionale)

Aridhi Kais<sup>1</sup>, Aridhi Sabri<sup>2</sup>, Abdoullah Ould Bagga Mohamed<sup>3</sup>,  
Fouad Zargouni<sup>1</sup>, Eric Mercier<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*University of Tunis El Manar, Department of Geology, Tunis, Tunisie*

<sup>2</sup>*ETAP, entreprise tunisienne d'activité pétrolière, Tunisie*

<sup>3</sup>*Faculty of Sciences of Gabès, Department of Geology, Gabès, Tunisie*

<sup>4</sup>*LPG, Nantes*

Au front de la nappe numidienne affleure une série continue sur une vaste étendue : de la région de Mateur au NE jusqu'à la ville de Beja et le domaine d'Ain El Bey au SW, attribuée à la zone des écailles de Kujawski 1969, et qualifiée d'unité Kasseb de Rouvier, 1977. Son équivalent nord, qui affleure au niveau de la fenêtre tectonique des Nefza et sur le prolongement NE-SW de l'accident de Cap Serrat-Ghardimaou est attribuée à l'unité Ed Diss. Au niveau du domaine des monts de

Bou Heurtma on retrouve une des structures clé, relatif essentiellement à l'unité Kasseb. En effet l'écaille de Sidi Yousef et sa continuité ouest, la localité de Dir El Kef sont les derniers affleurements, vers l'Ouest qu'on peut les qualifier sous la nomenclature de l'unité kasseb du domaine des monts de Bou Heurtma. La dalle eocène de Sidi Youssef de direction EW est une écaille qui présente une particularité remarquable, vu qu'elle affiche une semelle formée de Trias et de Miocène inférieur, contrairement à ses jumelles plus à l'Est, qui leurs semelles sont chronostratigraphiquement contenues. La présence de série tertiaire (Burdigalien-Serravallien qui était à l'origine sa couverture tertiaire réduite) au niveau du soubassement de l'écaille de Sidi Yousef, comme pour celle de Dir El Kef, nous laisse raisonner sur un plan paléogéographique et de la sorte conclure que les couches de l'Eocène de Sidi Youssef peuvent être qualifiés d'un lambeau de poussé, arraché et tronqué à partir d'une crête d'une ride situé plus au Nord, et puis transportée par le bais de cette semelle, sur un niveau de décollement plus profond (le Trias de Sidi Yousef). Cette ride paléogéographique aurait été placée normalement plus au Nord et pourrait coïncider avec celle de Cap Serrat-Ghardimaou (Ould Bagga, 2003, 2006), affiché actuellement au niveau de la fenêtre d'Ain Alagua. Ceci dit donc, l'écaille de Sidi Youssef pourrait probablement ne pas appartenir à l'unité Kasseb (Rouvier, 1977) mais plutôt à son équivalent nord celle de l'unité Ed-Diss.

### 3.10.14 *Keynote communication* : **Caractérisation des eaux de formation et de leur interaction avec les hydrocarbures dans un bassin d'avant pays. Cas du bassin des Llanos - Colombie**

Isabelle Moretti<sup>1,2</sup>, Felipe Gonzalez-Penagos<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> GDF SUEZ, Paris La Défense

<sup>2</sup> IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison

<sup>3</sup> Pacific rubiales, Bogota, Colombie

Le bassin des Llanos est l'avant pays continental de la branche Est des Andes colombiennes. Le travail vise à comprendre comment eaux, gaz et hydrocarbures y migrent et interfèrent. Il intègre une approche de collecte massive de données et d'analyses fines des fluides et des argiles, roche mère ou non, avec une modélisation 3D de l'évolution du bassin. L'eau douce est souvent interprétée comme simplement due à des infiltrations d'eaux météoriques mais, dans le cas d'un bassin au contenu en argile élevé, la diagénèse des argiles peut être une source très importante d'eau douce. Cette déshydratation des argiles en particulier au moment du passage smectite-illite est limitée dans le temps et l'espace mais les conditions de température dans les Llanos la facilite en particulier durant tout le quaternaire. L'étude des données de puits montre que le % initial de smectite est de l'ordre de 30% et que le passage Smectite/Illite s'y fait à 3 km de profondeur. La cinétique de cette réaction est souvent proposée sur la base d'études en laboratoire et les équations divergent selon les auteurs, nos données sur les Llanos ont permis de la préciser en conditions géologiques. L'étude des échantillons d'eau prélevés sur les puits pétroliers et dans les rivières a aussi permis de préciser l'évolution de la chimie des eaux en fonction de leur position (N-S-E-W) et de leur profondeur. Les caractéristiques des eaux ne peuvent s'expliquer par un mélange binaire eau météorique + eau de formation. Une troisième source est nécessaire en particulier dans l'ouest du bassin. Enfin l'étude des isotopes des HC et des gaz non HC dont les gaz rares prélevés dans les puits permet de préciser la zone d'infiltration des eaux météoriques, restreinte à une frange relativement superficielle à l'Est et au Sud. Les caractéristiques des HC proches de la Cordillère qui ont un faible degré API ne sont pas compatibles avec de la biodégradation mais suggèrent une roche mère peu mature. L'ensemble des données a été combiné pour réaliser un modèle 3D tenant compte des 4 roches

mères, de l'hydrodynamisme et de la transformation S/I et calibré sur les données de températures, de maturité, d'HC, de salinité des eaux, et d'avancée de la transformation smectite/illite.

### 3.10.15 (o) **L'effet des surpressions d'hydrocarbures sur les décollements de roches mères : modélisations numériques des chaînes Subalpines**

Josselin Berthelon<sup>1,2</sup>, William Sassi<sup>1</sup>, Evgueni Burov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison

<sup>2</sup> ISTE, Paris

Les chaînes Subalpines des Bornes, de la Chartreuse et du Vercors présentent une stratigraphie et un calendrier de déformation semblables, mais montrent des styles structuraux différents où l'importance de l'héritage structural et de la stratigraphie mécanique a déjà été souligné. Ces chaînes sont caractérisées par un décollement majeur dans les faciès argileux roche mère du Lias et notamment du Toarcien. Les modélisations cinématiques (Deville & Sassi ; 2006) montrent des différences dans le calendrier de maturation de ces roches mères qui peut s'effectuer de manière pré-tectonique (Vercors), synchrone de la sédimentation syn-orogénique (bassin Molassique) ou synchrone des chevauchements (Chartreuse).

Les propriétés mécaniques des argiles dépendent de leur minéralogie, des changements physiques et des surpressions de fluides. Tous trois évoluent avec l'enfouissement et la température ce qui impacte le comportement des décollements argileux. L'augmentation de la température au sein des roches mères modifie notamment la matière organique qui se transforme en huile, puis en gaz conduisant à des changements pétrophysiques et des surpressions de fluides qui ont déjà montré une influence sur le style de déformation. La synchronisation entre génération des hydrocarbures et mise en place des chevauchements pour certains transects Subalpins nous questionne sur l'origine des changements du style structural. Des expériences numériques prenant en compte le comportement mécanique des couches sédimentaires peuvent renseigner ces questions. Une série de modélisations est réalisée avec le code thermomécanique FLAMAR (Burov et al, 2014) couplant l'interaction entre l'évolution cinématique des nappes tectoniques et la localisation des horizons argileux. Parmi les paramètres testés dans les scénarios d'évolution, on prêtera notamment attention aux transformations de phases solide-fluide d'origine diagénétique ou organique en lien avec l'augmentation de température et donc à l'épaisseur des décollements nécessaires au déclenchement et au déplacement des nappes.

Burov, E., Francois, T., Yamato, P., Wolf, S., 2014. Mechanisms of continental subduction and exhumation of HP and UHP rocks. *Gondwana Res.* 25, 464-493

Deville, E., Sassi, W., 2006. Contrasting thermal evolution of thrust systems : An analytical and modeling approach in the front of the western Alps. *AAPG Bull.* 90, 887-907

### 3.10.16 (o) **The transpressive left-lateral Sierra Madre de Chiapas and its buried front in the tabasco plain (south Mexico)**

Cesar Witt<sup>1</sup>, Stéphanie Brichau<sup>2</sup>, Andrew Carter<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Géosystèmes, Lille

<sup>2</sup> IRD, Marseille

<sup>3</sup> Thermochronometry Group, University College of London-Birbeck, London, Royaume-Uni

The Sierra Madre de Chiapas evolved in the vicinity of the triple junction between the Cocos, North America and Caribbean plates. Major exhumation and topographic growth occurred during the middle-late

Miocène. This is constrained by fault activity, major stratigraphic unconformities along the SMC and the Tabasco coastal plain (i.e. southern Gulf of Mexico), major salt-related motion, northward progradation of sediments and by the northward migration of the buried deformational front. During Neogene, strike slip deformation and related exhumation has migrated landwards from the western edge of the Chiapas massif to the Chiapas Sierra. Horizontal displacement along the main strike-slip faults on the Sierra may be comprised between 30 and 43 km during the last 6-5 Ma involving 0.5-0.8 cm/a of lateral accommodation. These values suggest that a significant amount of the motion transferred from the Caribbean and North American plates is currently accommodated along the Chiapas area.

Sediment provenance and low temperature thermochronology results show that Palaeocene-Eocene terrigenous units (outcropping at the northern section of the Sierra) were derived from Grenville (~ 1Ga) basement whereas internal section of the chain display Chiapas massif-derived (270-250 Ma) components. Batholith-related input increases with the onset of major tectonic deformation at 16-9 Ma. Apatite fission track and (U-Th)/He data combined with previously published results define three main exhumation periods : 1) A slow 40-25 Ma exhumation affecting the massif and relatively unexpressed along the Chiapas Sierra ; 2) A fast 16-9 Ma exhumation period related to the onset of major strike slip deformation related to the Caribbean-North American plates limit and affecting both Chiapas massif and Chiapas Sierra ; and 3) A 6-5 Ma period affecting the Sierra and coincident with the landward migration of the plate limit. Stratigraphic, cinematic and thermochronologic evidence suggests that the left-lateral strike-slip faults bounding the Chiapas Sierra to the west accommodates most of the current displacement between the North American and Caribbean plates.

### 3.10.17 (o) The role of frictional softening and erosion on thrusting sequences in accretionary prisms based on sequential limit analysis

Baptiste Mary<sup>1</sup>, Bertrand Maillot<sup>1</sup>, Yves-Marie Leroy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GEC, Cergy Pontoise

<sup>2</sup>LGE, Paris

The Sequential Limit Analysis method is applied here on sedimentary rocks accreted by tectonic compression above a basal décollement (such as accretionary prisms) in a 2D vertical cross-section with uniform properties. Each shortening increment combines a thrust fold (TF) kinematics inspired by fault-bend folding, and a mechanical optimization to select the TF parameters (position along the décollement and dips of the ramp and of its conjugate shear plane) that require the minimum tectonic force. The rocks are described by their density, the Coulomb criterion, and a drop in the friction angle on the active ramp (friction softening). History of the position of the active TF along the décollement (i.e., the length of the slipping part of the décollement), and the associated internal deformation, can be followed for arbitrary amounts of shortening. Without friction softening we observe a chaotic length of slip on the décollement due to its extreme sensitivity to topographic surface perturbations. However, a statistical analysis reveals a step-wise distribution of slip on the décollement, that can be explained by a simple geometric construction. Frictional softening (i) perturbs the slip pattern on the décollement, (ii) provides a finite life span to every TF and a finite thickness to thrust sheets and, (iii) creates a long-term cyclicity of activation of the accreting frontal region and recurrent activation of the large ramps in the back of the prism. This long-term recurrence is modulated by the accreting sedimentary mass flux. A simple, sand-box like, erosion law prolongs the activity of the thrust-folds and provokes the formation of imbricate fans, duplexes, and the exhumation of deep materials, very much as observed in real settings and analogue models.

Thus many features of orogenic wedges can be reproduced invoking only friction softening and erosion in an otherwise uniform accreted material and décollement plane.

### 3.10.18 (p) Etude structurale du bassin de Hualaga (avant-pays péruvien) : apport de la modélisation analogique

Sandra Borderie<sup>1</sup>, Cesar Witt<sup>1</sup>, Fabien Graveleau<sup>1</sup>, Bruno Vendeville<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosystèmes, Lille

Le front de déformation oriental de la Cordillère des Andes est marqué par la zone sub-andine, qui comprend un ensemble de bassins d'avant-pays déformés. Au Pérou, trois bassins majeurs, du nord au sud, les bassins de Huallaga, d'Ucayali et de Madre de Dios, présentent des styles de déformation très contrastés. Alors que dans le bassin de Huallaga, la déformation est contrôlée par l'existence de niveaux évaporitiques d'âge Trias-Jurassique, elle est dirigée majoritairement par une tectonique de socle dans le bassin d'Ucayali (tectonique thick-skin), et redevient superficielle dans le bassin de Madre de Dios (tectonique thin-skin). L'objectif de ce travail de thèse est de comprendre les raisons de ces variations structurales et de contraindre l'évolution de la déformation dans ces bassins d'avant pays. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés au bassin de Huallaga.

Les lignes sismiques acquises au travers du bassin de Huallaga pour l'exploration pétrolière nous ont permis d'analyser sa structure et de proposer une carte tectonique préliminaire. Ainsi, la déformation au Nord est marquée par la présence de grandes nappes chevauchantes, dont le raccourcissement absorbé peut atteindre 50 km (par exemple, le chevauchement de Chazuta). Au Sud, la déformation est définie par un système de chevauchements et retrochevauchements qui se répartissent le raccourcissement.

La couverture des lignes sismiques restant éparse et les données de forage se résumant à un seul puits foré dans le sud du bassin, il est délicat de contraindre la structure profonde de la zone étudiée. Pour pallier ces limites, nous avons développé des expériences de modélisation analogique afin de tester des hypothèses sur la structuration du bassin et d'affiner des scénarii d'évolution. Un premier modèle a montré le rôle essentiel de la présence de deux niveaux de décollement (notamment d'une province salifère) sur la propagation de la déformation et l'accommodation du raccourcissement. Dans nos expériences, la nappe chevauchante obtenue absorbe par exemple un glissement important (60 % du raccourcissement total) et témoigne de mécanismes possibles expliquant la mise en place du chevauchement de Chazuta. De prochains modèles sont en cours de préparation afin d'affiner et de tester nos différentes interprétations de structuration et d'évolution du bassin.

### 3.10.19 (p) Geometric evidence for synchronous thrusting in the southern Bolivian Subandes : Implications for critical wedge kinematics

Stephane Brusset<sup>1</sup>, Patrice Baby<sup>2</sup>, Koné Ouodiouma<sup>2</sup>, Vincent Jarné<sup>2</sup>, Mahamadou Coulibaly<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>GET/IRD, Toulouse

Southern Bolivian Subandes are characterized by complex frontal thrust-geometries and have been intensively studied by balanced cross-section techniques from extensive sub-surface and field data. Former studies established that deformation is propagating through an heterogeneous mechanical stratigraphy in which, at least two décollements dominate. These décollements are located at the base and within the

stratigraphic pile in Silurian shales and in Devonian shales. They determine two structural levels : a deep-seated duplex and shallower imbricates which sole-out on its roof thrust. We investigate the kinematics of such thrust-systems by budgeting slip between two structural levels at structure scale (mapped anticlines) and at frontal thrust-wedge scale. At fold scale, the balanced geometry exhibits synchronous thrusting which drives the thrust-sequence propagation in the shallow imbricates. This feature is suspected to illustrate internal thrust-wedge thickening which controls hydrocarbon generation and migration.

### 3.10.20 (p) The Holy Cross Mountains (northeastern foreland of the European Variscides) as an intraplate triangle zone

Lukasz Gagala<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Georex

<sup>2</sup>Institute of Geological Sciences, Polish Academy of Sciences Twarda, Warszawa, Pologne

The Holy Cross Mountains (HCM) comprise a solitary Paleozoic massif that emerges from beneath a Permian-Mesozoic cover ~100 km beyond the southwestern edge of the East European Craton. The HCM are subdivided into the Łysogóry Zone in the north and the Kielce Zone in the south. These are separated by the Holy Cross Fault. The HCM experienced tectonic inversion in the Late Cambrian (local Sandomirian phase), Late Silurian-Early Devonian (Caledonian), ?Late Carboniferous (Variscan), and the Late Cretaceous-Paleocene (Laramide). Most of the present regional structural fabric was inherited after Variscan shortening. The Variscan structures overprint, yet not entirely conceal the pre-existing Caledonian and Sandomirian geometries.

The HCM belt consists of two structural domains : 1) a south-vergent thin-skinned system in the north and 2) a thick-skinned system in the south. The thin-skinned system has been thrust to the south along a detachment that follows Mid Cambrian shales in the Łysogóry Zone and climbs up to Early Silurian graptolite shales in the northern part of the Kielce Zone. The foreland limit of the thin-skinned system is controlled by the subsurface extent of the Early Silurian graptolite shales.

The structure of the HCM indicates a dominant role of plain-strain shortening during Variscan inversion. Tectonic transport was from the structural depression in the north (Łysogóry Zone) to the structural high in the south (Kielce Zone). Such a configuration is diagnostic of passive-roof backthrusting. The structure of the HCM is therefore interpreted as a crustal-scale triangle zone that was created by the indentation of the leading edge of the Kielce Zone into the Mid Cambrian detachment of the Łysogóry Zone. This solution complies with the present (~Variscan) structural geometries but also offers a key to understanding the kinematics of the Caledonian and Sandomirian phases of inversion.

### 3.10.21 (p) A reappraisal of the structure and kinematics of the southern Atlas foreland, Tunisia

Mohamed Gharbi<sup>1</sup>, Nicolas Espurt<sup>1</sup>, Amara Masrouhi<sup>2</sup>, Olivier Bellier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>CERTE : Water Researches and Technologies Center, Soliman, Tunisie

The structure of the southern Atlas foreland of Tunisia were investigated using new geologic mapping, seismic reflexion data together with the construction of a balanced cross section. The structural architecture of the Tunisian foreland consists in a mixed tectonic style with deep-seated basement faults, shallower décollements within sedimentary cover and salt diapirism. Structural geometry and orientation of

the pre-existing Triassic-Turonian extensional structures controlled subsequent contractional deformation within the sedimentary cover. The Orbata and Chemsî structures result from tectonic inversion of major Aptian-Turonian extensional structures. During the shortening, this inherited Mesozoic tectonic framework controlled the development of ENE-trending thrust-related anticlines such as the Orbata and Chemsî structures, NW-trending lateral ramp such as the Gafsa and Fejej faults and diapir structures as the Beidha anticline. The growth of the internal Orbata thrust occurred between the Late Campanian-Paleocene and can be correlated with the onset of the convergence between Africa and Eurasia. The Cenozoic tectonic compressions in the southern Atlasic domain occurred during three periods : Late Eocene, Miocene and Pliocene-Quaternary. In the southern Atlasic domain of Tunisia, the Pliocene-Quaternary compressional event corresponds to the main tectonic event with major structural inversions. This study underlines the predominant role of inherited basement structures acquired during the evolution of the southern Tethyan margin, and their influence on the geometry of the Atlasic fold-and-thrust belt.

### 3.10.22 (p) The role of evaporite levels and pre-cretaceous structures in thrusts propagation of the northern Ucayali subandean basin, Perú

Christian Hurtado<sup>1</sup>, Patrice Baby<sup>2</sup>, Ysabel Calderon<sup>3</sup>, Rolando Bolaños<sup>3</sup>, Carlos Monges<sup>4</sup>, Hugo Pelliza<sup>4</sup>

<sup>1</sup>National University of San Marcos, Lima, Pérou

<sup>2</sup>IRD, Lima, Pérou

<sup>3</sup>PERUPETRO S.A, Lima, Pérou

<sup>4</sup>Gran Tierra Energy Perú, Lima, Pérou

From new seismic data, field works and regional correlations, we show that the northern Ucayali Subandean fold and thrust belt, located in the eastern flank of the Andes of Central Peru, is characterized by strong shortening controlled by the presence of two evaporite levels and the reactivation of pre-cretaceous thrusts. Seismic data shows that such compressive paleo-structures are preserved more to the east in the present foreland basin below the basal Cretaceous regional unconformity, and can be inherited from the Nevadan orogeny. This paper integrates surface data and seismic data and presents two balanced cross-sections showing the development of a low angle frontal thrust with more than 30 km of displacement. Stratigraphic regional correlations shows that the deep evaporite level, where developed the main décollement, is Permian in age, whereas the upper evaporite level is Triassic and plays a minor role in thrust propagation.

### 3.10.23 (p) Evolution structurale et sédimentaire du front de chaîne Meratus - S-E de Borneo (Indonésie)

Virginie Le Gal<sup>1</sup>, Jean-Claude Ringenbach<sup>2</sup>, Aurélie Girard<sup>3</sup>, Jean-Michel Gaulier<sup>4</sup>, Irfan Cibaj<sup>4</sup>, Manuel Pubellier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LGE, Paris

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>3</sup>TOTAL, Puteaux

<sup>4</sup>TOTAL, Indonésie

Cette étude, qui a pour objectif de réaliser une cartographie géologique et structurale plus détaillée du front de chaîne Meratus, s'articule essentiellement autour d'une cartographie satellitaire accompagnée d'un travail de terrain et d'une synthèse des données puits et sismiques disponibles sur cette zone.

La suture ophiolitique du Meratus date du Crétacé-Paléocène. Elle est

suivie d'une phase d'extension à l'Eocène, puis d'une deuxième phase de compression au Miocène complexifiant la chaîne et impliquant le bassin de Barito adjacent dans la déformation. Les observations du front de chaîne montrent de nombreuses structures de compression (plis, chevauchements, rétrochevauchements, uplifts) disposées en échelon associées à une forte composante décrochante (failles subverticales). De cette étude découle une meilleure compréhension de la déformation, essentiellement thick-skinned du front de chaîne, illustrée par une carte géologique plus détaillée de la région ainsi que quelques coupes.

### 3.10.24 (p) Apatite (U-Th)/He and fission track double dating of thrusts exhumation in the central Peruvian Amazonian Subandes

Nicolas Espurt<sup>1</sup>, Cécile Gautheron<sup>2</sup>, Jocelyn Barbarand<sup>2</sup>, Martin Roddaz<sup>3</sup>, Patrice Baby<sup>3</sup>, Stéphane Brusset<sup>3</sup>, Ysabel Calderon<sup>4</sup>, Rolando Bolaños<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>IDES, ORSAY

<sup>3</sup>GET, Toulouse

<sup>4</sup>PERUPETRO, Lima, Pérou

Precise knowledge of timing of deformation in the Amazonian central Subandean zone of the Andean Plateau is a prerequisite to decipher the Late Neogene growth of the Andean Plateau, the formation of the Subandean HC fields, and to understand the development and the sedimentary infill of the Mio-Pliocene Amazonian basin. In this study, we report apatite (U-Th)/He (AHe) and fission track (AFT) ages, and vitrinite reflectance (Ro) data from Peruvian Subandes thrust-belt and foreland strata along three balanced cross sections. Cross section balancing shows that the along-strike structural architecture of this fold-thrust belt was mainly controlled by inherited Paleozoic structures leading to vertical partitioning of the shortening between thick- and thin-skinned thrusts. The restoration of the three balanced cross sections shows a homogeneous minimum total horizontal shortening of ~ 55 km (~ 30%). AHe data from the northern thick-skinned domain (Shira Mountain, Oti-shi Cordillera and Ucayali basin) show younger reset ages (minimal cooling age ranges from  $2.6 \pm 0.2$  to  $13.1 \pm 0.8$  Ma), compared to partially reset AFT ages (from  $101 \pm 5$  to  $133 \pm 11$  Ma). The sedimentary infill of the northern thick-skin domain was sufficient enough to reset the AHe system but not the AFT system. Only in the southern deepest sedimentary Camisea basin, where deformation is mainly thin-skin, both AHe and AFT ages have been reset and show young cooling ages ( $3.7 \pm 0.8$  Ma and  $8 \pm 2$  Ma, respectively). Sequential restoration calibrated with AFT, AHe and Ro data indicates that the shortening transfer from the Andean Plateau into the Peruvian Subandean zone initially started at ~ 14 Ma. Our data provide the first field example of how deformation and exhumation of thrust faults in the Subandes can be directly dated through AFT and AHe double dating and provide temporal constraint for the formation of the Camisea giant gas field.

### 3.10.25 (p) How pre-orogenic structural inheritances controlled the Provence thrust system, SE France

Lucie Bestani<sup>1</sup>, Nicolas Espurt<sup>1</sup>, Juliette Lamarche<sup>1</sup>, Bellier Olivier<sup>1</sup>, Fabrice Hollender<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>CEA Cadarache, St Paul Les Durance

The Late Cretaceous-Eocene and Miocene-present-day deformations of the Provence fold-thrust belt still raise questions and the role of the

Paleozoic-Mesozoic pre-orogenic substratum geometry has never been quantified. To decipher the pre-orogenic substratum geometry of Provence, we used surface and subsurface data to construct two N-S balanced cross-sections (~ 130 km) between the Baronnies to the north and the Mediterranean Sea to the south. The Provence fold-thrust belt is divided into two distinct parts by the Mid Durance/Aix-en-Provence faults system inherited from Paleozoic times. This fault system is responsible for strong thickness variations in the Mesozoic sedimentary prism ranging from 3 (SE part) to ~ 10 km (NW part). The southeastern Provence unit is characterized by the inversion of deep-seated late Paleozoic-Triassic extensional structures. In contrast, the northwestern Provence unit is essentially controlled by thin-skinned tectonics above Triassic series. Cross-section balancing shows an along-strike heterogeneous horizontal shortening from 6 to 42 km. These results show that during the Late Cretaceous and Miocene compressions, the Mid Durance/Aix-en-Provence faults system played the role of a regional transfer zone between the northwestern and southeastern Provence units and separated two contrasted structural domains. Where the sedimentary pile is thin, the reactivation of basement faults induced a thick-skin style. On the contrary, where the sedimentary pile is thick (>7km), the reactivation of basement structures is not necessarily involved in the accommodation of the shortening, leading to a thin-skin style. Moreover, Paleozoic basement structured by Hercynian tectonics induced perennial structural trends during Mesozoic. Long-lasting reactivation of these inherited faults gave rise to thickness, lithological and, therefore, mechanical and structural style variations in Provence.

### 3.10.26 (p) Structural style of a compressive wedge with salt and coal shale decollement levels : Analogue and seismic modeling of the Kuqa thrust belt (North Tarim, China)

Jean-Paul Callot<sup>1</sup>, Wang Guichong<sup>2</sup>, Isabelle Moretti<sup>3</sup>, Gu Yongxing<sup>2</sup>, Jean Letouzey<sup>4</sup>, Shengyu Wu<sup>5</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau

<sup>2</sup>Korla Geophysical Branch, Korla, Chine

<sup>3</sup>GDFSuez, La Défense

<sup>4</sup>Letouzey consulting, Viroflay

<sup>5</sup>C&C Reservoirs, Houston, États-Unis

The Kuqa foreland fold and thrust belt developed along the uplifted basement block of the Tien Shan block, the Tarim basin in foreland setting since early Oligocene. Its geometry is controlled by two major decollement levels. Thin skin deformation and Mesozoic thrust sheet developed above the Triassic and Jurassic coal and shale layers respectively. The Paleogene and Neogene salt ridges and synclines resulted from salt migration above the stacked thrust sheets. 4D Analogue models imaged with X-ray tomography are used to analyse the relative importance of (1) the kinematic boundary conditions, (2) the rheological behaviour of the main decollement levels, and (3) erosion and sedimentation. The experiments show that the geometry of the belt is controlled by the regional distribution of both decollement levels. The lower decollement has a weak frictional behaviour, and pinches toward the south, whereas the viscous salt layer thickened in the west, evolves regularly to clastic deposits to the South, and to the North close to the Tien Shan boundary. The geometry of salt ridges and diapirs developed during the early tectonic phase associated with a low sedimentation rate controls the shape and localisation of the future foreland synclines and boundaries. The foreland synclines grow during the late stage of evolution with a rapid increase in flexure and sedimentation rate. The backstop shape controls the dip of the Mesozoic thrust sheets. Inverted basement block related to a deep short cut are emplaced during the late stage of evolution and

control together the overall geometry of these units. Based on the analogue model 3D blocks, the geometry of the thrust sheets and foreland syncline are used to perform a synthetic seismic acquisition, to test our ability to image the deep parts of the thrust sheets. The recovered seismic data demonstrate that the thrust sheet deep legs are missed.

### 3.10.27 (p) Analyse mécanique de la tectonique thin-versus thick-skin dans le bassin molassique et le nord du Jura

Typhaine Caer<sup>1</sup>, Bertrand Maillot<sup>1</sup>, Pauline Souloumiac<sup>1</sup>, Christophe Nussbaum<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GEC, Cergy Pontoise

<sup>2</sup>Office fédéral de topographie swisstopo, Suisse

L'analyse limite est une approche mécanique grâce à laquelle nous étudions la tectonique actuelle dans la chaîne de chevauchement-plissement du Jura. Cette chaîne est classiquement interprétée comme une chaîne de couverture mise en place au Mio-Pliocène sur un niveau de décollement peu profond situé dans les évaporites triasiques et qui surmonte des grabens Permo-carbonifères orientés E-W et délimités par des failles décrochantes N-S probablement enracinées sur un niveau de décollement situé entre la croûte supérieure et la croûte inférieure. Des tremblements de terre indiquent que le Jura est encore soumis à de la déformation de nos jours. La question est alors de savoir quel est le niveau de décollement actuellement actif sous le Jura. Nous réalisons trois prototypes correspondant à des coupes géologiques entre le centre des Alpes et le front Nord du Jura, en tenant compte de l'héritage tectonique, et nous les soumettons à une étude paramétrique où nous faisons varier les angles de friction des matériaux et des discontinuités ainsi que la rhéologie de la croûte inférieure. Nous retenons alors toutes les solutions pour lesquelles nous obtenons le même style tectonique pour les trois prototypes, en ayant considéré les mêmes paramètres. L'hypothèse thin-skin apparaît globalement plus probable que l'hypothèse thick-skin car elle est associée à une plus grande gamme de valeurs des paramètres rhéologiques. En considérant ensuite la topographie avant l'érosion glaciaire du bassin molassique, nous montrons également que la variation de topographie engendrée par cette érosion a pu jouer un rôle dans l'évolution de l'expression de la déformation dans le Jura.

### 3.10.28 (p) Les mécanismes de déformation associés à la mise en place des plis couchés kilométriques Hercyniens dans les Pyrénées : modèles analogiques, et étude de terrain

Audrey Taillefer<sup>1</sup>, Jacques Malavieille<sup>2</sup>, Stéphane Dominguez<sup>2</sup>, Alfredo Taboada<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier

Dans les Pyrénées, on associe la mise en place de grandes nappes de plis couchés à la tectonique d'avant pays de la chaîne Hercynienne, dans une zone située au Sud du Pic du Midi d'Ossau. Ces grands plis à flancs plurikilométriques se sont formés dans des niveaux structuraux peu profonds comme le suggère l'absence de métamorphisme et de schistosité associée. Les mécanismes de formation de ce type de plis ont été étudiés à l'échelle d'un prisme orogénique grâce à une approche expérimentale (Perrin et al., 2013). Des modèles analogiques dans lesquels un multicouche fragile-plastique est déformé dans un contexte de prisme soumis à l'érosion ont permis de proposer une hypothèse originale. Les alternances de couches fragiles/plastiques favorisent le déversement des

plis, tandis que l'érosion les maintient dans des niveaux structuraux supérieurs. Un déroulement de la charnière synclinale, au sein d'une large bande de cisaillement, caractérise le mécanisme de formation de ces plis. Afin de mieux dimensionner les modèles, et valider cette hypothèse, nous avons amélioré les matériaux et la procédure expérimentale. Nous avons caractérisé le comportement rhéologique de la Plastiline utilisée, qui s'avère être élasto-plastique durcissant, ce qui est typique des roches carbonatées déformées dans la croûte supérieure. Cela en fait un bon analogue des roches plissées dans les prismes orogéniques soumis à l'érosion. Nous avons alors diminué sa résistance en créant des mélanges huiles de vaseline-plastiline. Des tests effectués avec cette plastiline moins résistante permettent de mieux comprendre les mécanismes de formation des grands plis couchés. Une étude microstructurale de la déformation observée dans les plis du Pic Moustardé, permet de faire le lien objet naturel/modèle analogique. Une telle étude permet une meilleure compréhension du rôle de la rhéologie dans les mécanismes de plissement, et des processus de déformation actifs lors de la croissance des prismes orogéniques.

### 3.10.29 (p) Kinematics of fault propagation folds. Predicting the detachment level and thrust shape

Timothy Davis<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Midland Valley, Glasgow, Royaume-Uni

A stacked sequence of fault propagation folds is a common structural style in a thrust wedges. These folds are 3 dimensional structures often with considerable along strike variation. However to better understand the geometry of these structures geologists often use 2D techniques to predict the underlying fold shape, fault shape and depth to the detachment in these structures. Current geometric techniques for structural modelling make a number of assumptions in order to simplify the modelling process. For example it is usually assumed that the area affected by folding remains constant through time and that the folding is predominantly parallel not similar. In addition many models use an assumed regional which becomes cumbersome in wedge environments with a series stacked of folds that are temporally and spatially linked during formation.

This talk will highlight current techniques and their associated benefits and pitfalls and discuss some novel ideas that can be applied to thrust wedge evolution to help predict blind thrust geometries and give clues about fold evolution through time. Sandbox models and high quality seismic from evolving accretionary prisms allow for these methods to be tested against real world examples. The desired outputs of the predictive methods are well established in these examples allowing for an estimation of confidence and error from the different predictive techniques.

### 3.10.30 (p) Contrôle paléogéographique et inversion tectonique de la chaîne tellienne et numidienne de la Tunisie septentrionale : domaine d'Ain El Bey-Bou Awen-Ain Al-laga

Aridhi Kais<sup>1</sup>, Aridhi Sabri<sup>2</sup>, Abdoullah Ould Bagga Mohamed<sup>3</sup>, Fouad Zargouni<sup>1</sup>, Eric Mercier<sup>4</sup>

<sup>1</sup>University of Tunis El Manar, Department of Geology, Tunis, Tunisie

<sup>2</sup>ETAP, entreprise tunisienne d'activité pétrolière, Tunisie

<sup>3</sup>Faculty of Sciences of Gabès, Department of Geology, Gabès, Tunisie

<sup>4</sup>LPG, Nantes

Le modèle de sédimentation et le schéma paléogéographique qui en découlent proposés par les auteurs, font intervenir une phase de serrage provoquant selon son âge, une orogénèse fini-maastrichtienne (Gottis, 1952 ; Gottis et Sainfeld, 1955), Eocène (Rouvier, 1977) ou une subduction intracontinentale (Dlala, 1995).

Contrairement à ces modèles, celui proposé dans ce travail, fait intervenir un régime tectonique transtensif générant un système de blocs basculés et demi Graben vers le SE suite à des accidents majeurs NE-SW, additionnés à d'autres NW-SE, qui ont un contrôle sédimentaire simultané et aussi ultérieur. Au cours de ce régime le matériel triasique subit un fluage en direction des crêtes des blocs basculés. Lors de la compression Alpine, la propagation des décollements basaux à travers la marge Nord Africaine en Tunisie, s'est traduite par la différenciation de rampes frontales (parallèles à la direction de la chaîne Tellienne). Nous montrons ici que simultanément aux rampes frontales, des rampes latérales se sont également mise en place. Selon la localisation des rampes, deux sortes de plis dont l'axe est parallèle à la direction de transport, peuvent être distingués : (I) des plis de rampe latérale localisés dans la série allochtone initialement située au-dessus d'une rampe latérale et (II) des plis de drapage formés au dessus d'une rampe latérale après substitution de couverture. Nous démontrons à l'aide de critères géométriques et tectono-sédimentaires sur deux structures d'échelles différentes, que certains plis latéraux de la chaîne Nord-tunisienne correspondent à des plis de rampes latérales et que ces rampes ont pris place à l'aplomb de failles normales héritées, perpendiculaires à la chaîne.

La relation entre ces différentes structures a servi comme outil de décryptage de la séquence de chevauchement et de proposer une nouvelle chronologie de la déformation. La restriction de ces structures à une bande de terrain limitée par deux failles parallèles à la direction régionale de déplacement, a permis d'interpréter ces accidents comme étant des failles de déchirure co-génétiques de la propagation des chevauchements, qui séparent deux styles de déformation différents. Nous suggérons que le caractère hautement non-cylindrique de la chaîne Tellienne de Tunisie est à mettre en relation avec l'abondance probable de ces structures latérales (Aridhi K, 2011 a-b).

### 3.10.31 (p) 3D Structural Model and seismotectonics of the Southern Alps-Northern Apennines-Po Valley system, Northern Italy

Claudio Turrini<sup>1</sup>, Pamela Angeloni<sup>2</sup>, François Roure<sup>3</sup>, Olivier Lacombe<sup>4</sup>,

<sup>1</sup>CTGeological Consulting, St Germain en laye

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente, Università degli Studi di Pavia, Pavia, Italie

<sup>3</sup>IFP-EN, Rueil-Malmaison

<sup>4</sup>ISTeP, Paris

By integrating the dataset available from the public domain (DEM, wells, isobath-maps, cross-sections, outcrop-trends), a 3D structural model of the Po Valley basin (Northern Italy) has been built using the MOVE package (Midland Valley).

The results (Marine and Petroleum Geology, 2014, in press) provide, for the first time, a unique three-dimensional geo-volume of the region this being at once 1) the northernmost Adria Plate domain, 2) the Alps indenter, 3) the common foreland-foredeep to the Southern Alps and the Northern Apennines thrust belts and 4) one of the most productive hydrocarbon province of continental Europe.

Following the 3D model building, the historical and instrumental earthquake events, made available by the national earthquake catalogue (INGV) in and around the study area, have been used to validate the performed structural architecture while suggesting the active tectonic framework during the last 1000 years.

The results confirm the performed three-dimensional geo-volume anatomy in most of the major model structures while indicating how deformation develops at the front of the Southern Alps and Northern Apennines belts, as well as across the foreland.

In details, we show that :

- The earthquake hypocenters (7-0 by magnitude) are distributed rather continuously along the outcropping front of the belts and patchy in the foreland,

- They reach considerable depth along the Northern Apennines front while they are mostly confined within the Mesozoic package along the Southern Alps front and the Po Valley foreland,

- there might exist an « earthquake-stratigraphy », so that the Moho, and the basement interfaces seem to better concentrate the seismic activity,
- earthquakes often occur in the footwall of both regional and local scale thrusts,

clear earthquake clusters are localised along linear fault zones, these being transversal to the main thrust orientation, and interference zones as well,

- the comparison of the model structures with the earthquake families, analysed by time and space around the region, allows the progression of deformation to be tracked across the entire tectonic system.

### 3.10.32 (p) Evaluation du degré de maturité de la matière organique par spectroscopie Raman : extension du géothermomètre RSCM vers la gamme 100-200°C

Abdeltif Lahfid<sup>1</sup>, Sylvain Delchini<sup>1</sup>, Guilhem Hoareau<sup>2</sup>, Brice Lacroix<sup>3</sup>, Xavier Bourrat<sup>1</sup>, Nemo Crognier<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>LFC-R, Pau

<sup>3</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, University of Michigan, Ann Arbor, États-Unis

La connaissance de températures de formation des roches est un paramètre important pour la reconstitution et la modélisation de l'histoire de domaines et de processus géologiques.

Parmi les nombreuses possibilités d'estimation des températures, le géothermomètre RSCM (Raman Spectroscopy of Carbonaceous Materials) apporte un critère relativement précis pour reconstituer l'évolution thermique d'un domaine géologique (histoire température-temps) à partir de l'étude des composés carbonés ubiquistes (e.g. Beysac et al., 2002, Aoya et al., 2010, Lahfid et al., 2010). Cet outil fournit ainsi des contraintes pertinentes sur l'histoire thermique des formations géologiques. Cependant, il n'a été calibré que pour la gamme 200-640°C avec une précision absolue de +/- 50°C et une reproductibilité interne bien meilleure de l'ordre de 10-15°C. La présente étude vise à étendre l'applicabilité du géothermomètre RSCM vers des températures plus basses que celles investiguées précédemment. Il s'agit de la gamme 100-200°C. Une série d'échantillons a été sélectionné. Parmi les zones d'échantillonnage figurent des bassins de la chaîne pyrénéenne. Les pics de températures de ces échantillons ont été estimés par des méthodes conventionnelles parmi lesquelles figurent le pouvoir réflecteur de la vitrinite, les inclusions fluides et la cristallinité de l'illite.

Un nouveau protocole de mesure, par microspectroscopie Raman, pour caractériser la structure des matériaux carbonés très désordonnés a été établi. Lors de l'analyse, plusieurs paramètres ont été ajustés tels que la puissance du laser, le nombre d'analyses par échantillon, le temps d'acquisition...

Une série de spectres de référence ont été alors acquis. Ces spectres ont permis de réaliser dans un premier temps une calibration qualitative de la méthode RSCM pour la gamme 100-200°C.

Afin de proposer une calibration quantitative, nous sommes entrain de définir une procédure fiable d'ajustement des spectres Raman afin de

déterminer des paramètres Raman pertinents pour la quantification thermique des matériaux carbonés très désordonnés dont les pics thermiques correspondent à la gamme 100-200°C.

Cette calibration pourra être appliquée pour reconstituer l'histoire thermique des bassins de marge passive profonde (cible actuelle pour l'industrie pétrolière).

### 3.11 Interactions déformation-sédimentation

**Responsables :**

- Thierry Nalpas (Géosciences Rennes)  
thierry.nalpas@univ-rennes1.fr
- Laurie Barrier (IPG Paris)  
barrier@ipgp.fr

**Résumé :**

La compréhension de l'évolution de la topographie de la terre et des systèmes tectoniques passe par l'analyse de la dynamique des bassins sédimentaires qui enregistrent cette évolution à travers la préservation des dépôts sédimentaires. En effet, l'évolution spatiotemporelle des faciès de ces dépôts est dépendante du type de processus créant les pentes autour et dans les bassins. En retour, l'évolution de la déformation est influencée par les changements de forces de volume (e.g. érosion/sédimentation) et de profil rhéologique (e.g. sédiments fragiles/ductiles) liés aux transferts de matière. Ainsi l'analyse des interactions déformation-sédimentation à toutes les échelles de temps et d'espace est essentielle pour la compréhension de la dynamique de la lithosphère. Nous proposons donc de focaliser cette session sur ces interactions à partir de travaux documentant de vraies rétroactions entre les processus sédimentaires et la déformation, c'est-à-dire où les sédiments ne sont pas considérés comme passif face à la déformation. Les exemples pourront concerner tous les types de bassin sédimentaire, ainsi que toutes les échelles de temps et d'espace.

### 3.11.1 (o) Impact of lithosphere deformation on stratigraphic architecture of passive margin basins

Delphine Rouby<sup>1</sup>, Ritske Huisman<sup>1</sup>, Cécile Robin<sup>2</sup>, Jean Braun<sup>3</sup>,  
 Cécile Robin<sup>4</sup>, Didier Granjeon<sup>5</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Department of Earth Science, University of Bergen, Norvège

<sup>3</sup>Géosciences Rennes

<sup>4</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>5</sup>IFP-EN, Rueil Malmaison

The aim of this study is to revise our view of the long-term stratigraphic trends of passive margins to include the impact of the coupling between the lithosphere deformation and the surface processes. To do this, we developed a new numerical procedure simulating interactions between lithosphere deformation and (un)loading effects of surface processes (erosion/sedimentation) in 3D with a special attention to the stratigraphic architecture of the associated sedimentary basins. We first simulate the syn-rift phase of lithosphere stretching by thermo-mechanical modeling. We then use the resulting lithosphere geometry as input of a 3D flexural modeling including coupling with surface processes to simulate the post-rift evolution of the margin. We then use the resulting accumulation and subsidence histories as input of the stratigraphic simulation to model the detailed stratigraphic architecture of the basin. We tested this procedure using synthetic examples of lithosphere stretching based on different rheologies of the lithosphere (i.e. strength of the lower crust) in the cases of narrow or ultrawide rifting. We determined the stratigraphic expression of the conjugate margins and show that they differ in terms of long-term stratigraphic trends, erosion/accumulation and lithological distribution in space and time.

In all cases, uplift/subsidence rates decrease with time while the flexure wavelength increases as isotherms are re-equilibrated. Some areas show displacement inversion over time from uplift to subsidence (or vice-versa). As expected, the amplitude of vertical motion of the wide margin cases is very limited with respect to the narrow margin case. Vertical motions are very asymmetric on conjugate margins. Accordingly, the stratigraphic architectures and the sedimentation/erosion patterns of the conjugate simulated margins are significantly different mostly because the duration and length of progradation and retrogradation differ. We evaluated the sensitivity of the simulations to parameters controlling (i) the lithosphere deformation, (ii) the continental drainage erosivity (climate) or (iii) erodability (lithology) as well as (iv) base level (eustasy).

### 3.11.2 (o) The pre-Mesozoic basement of the SW Paris basin (France) revisited - Focus on the structural evolution of the Late Carboniferous-Early Permian sedimentary basins under their post depositional cover

Laurent Beccaletto<sup>1</sup>, Olivier Serrano<sup>1</sup>, Laure Capar<sup>1</sup>, Stéphane Marc<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

Late Carboniferous to Early Permian basins are found in several rather small places in and around the present-day French Variscan basement. They are mostly considered as intramontane post-orogenic (Variscan) basins, developed in close relationships with crustal to lithospheric geological events. On the other hand, little is known about their subsurface occurrences under their post depositional sedimentary covers. This is for instance the case in the Paris basin, where only few regional studies aimed to find their location under the Mesozoic sedimentary cover.

Our approach is based on the interpretation of newly reprocessed seismic lines (about 1480 km length) acquired by the oil industry in the 80'. For the first time (1) we get a comprehensive view of the geometry of these basins (well data compilation, interpretation of geological surfaces and internal geometries, specific facies); (2) we are able to identify several families of faults according to their period of activity; (3) we propose a detailed structural pattern of the area, whose faults were active during the filling of the basins and discuss the mode of extension; (4) we calculate thickness maps both in TWT and in m, allowing a pseudo-3D view of the three identified basins (Arpheuilles, Contres and Brécy basins; thicknesses up to 3000 m); (5) finally we illustrate and estimate the pre-Triassic uplift recorded by these sedimentary basins (of about 1500 m).

As exemplified here, these geological objects still have much to teach us about the transition from the Palaeozoic Variscan cycle to the Mesozoic sedimentary cycle, not to mention their industrial applications.

### 3.11.3 (o) Caractérisation structurale multi échelles des interactions tectonique et sédimentaire de mini-bassins en contexte compressif, Sivas (Turquie)

Charlie Kergaravat<sup>1,2</sup>, Jean-Paul Callot<sup>2</sup>, Charlotte Ribes<sup>1,2</sup>,  
 Alexandre Pichat<sup>1,2</sup>, Etienne Legeay<sup>2</sup>, Cedric Bonnel<sup>2</sup>, Jean-Claude Ringenbach<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau  
<sup>2</sup>LFC-R, Pau

L'utilisation d'analogues de terrain, comme de laboratoire permet d'améliorer la compréhension des interactions entre la tectonique, la sédimentation et l'endommagement associé. Développé sur la suture de la Néotéthys Nord, en contexte compressif d'avant pays, le bassin de Sivas enregistre la formation et la déformation de bassins sédimentaires en contexte salifère, montrant des analogies géométriques frappantes avec les structures visible dans le Golfe du Mexique ainsi qu'au large de l'Angola.

Le cœur du bassin de Sivas présente une structuration en mini-bassins, délimités par des murs et diapirs d'évaporite, structurés en un damier polygonal. L'initiation de ces mini-bassins est caractérisée par le dépôt de la formation fluvio-lacustre de Karayün dès l'Oligocène. Puis, ces mini-bassins enregistrent une transgression caractérisée par des dépôts marins peu profonds (Karacaören Fm.) au Miocène inférieur.

L'étude de ces mini-bassins a pour but la caractérisation à plusieurs échelles des déformations liées au fluage des évaporites et leurs liens avec la déformation régionale. Plusieurs de ces mini-bassins ont subi des basculements importants (>40°) permettant une analyse détaillée de leur structure non visible à l'échelle sismique en particulier la succession de séquences halocinétiques multi-échelles révélant l'influence du fluage des évaporites lors de leur formation. Les longueurs d'ondes et les épaisseurs des séquences halocinétiques varient le long d'une bordure comme de part et d'autre d'un même mini-bassin.

L'élaboration de coupes permet de mettre en évidence : (i) Les structures d'interaction sédiments-évaporites au sein des mini-bassins et des contacts entre mini-bassins; (ii) Les variations entre le taux de fluage vertical des évaporites et le taux de sédimentation; (iii) Une pré-structuration du socle avant le dépôt des évaporites affecté par une compression N-S lors de la formation des mini-bassins.

### 3.11.4 (o) Controls on sedimentation of a fluvial system : the case of salt related minibasins, Sivas, Turkey

Charlotte Ribes<sup>1,2</sup>, Cédric Bonnel<sup>1</sup>, Charlie Kergaravat<sup>1,2</sup>, Jean-Paul Callot<sup>1</sup>, Philippe Crumeyrolle<sup>2</sup>, Jean-Claude Ringenbach<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

A limited number of mini-basins provinces have been described, especially with fluvial dominated infill. The mini-basin development is dependent on local factors such as salt tectonics which influence the rate and style of mini-basin subsidence and the surface topographic expressions. It is further dependent on the modification of regional factors, such as climate, tectonic regime and rates of sediment input. The Sivas basin is an elongated Oligo-Miocene basin showing numerous minibasins separated by evaporites structures such as welds and diapirs of various shapes, with spectacular outcropping conditions. This study focuses on ten of well-exposed mini-basins, which present a 1km to 2.5km sedimentary pile of continental sediment unconformably capped by a shallow marine deposit. The infill of these mini-basins began during the late Oligocene over an older basal evaporite layer, with (1) a playa-lake system deposited under arid climatic conditions (sheet-flood and evaporites), followed by (2) a braided fluvial system occurring during a humid period, (3) then a lacustrine system that is finally capped by (4) shallow marine deposits during the Early Miocene. This fluvial system with a lack of distinct river channels incision and related drainage patterns in arid to semi-arid climatic regimes looks like a distributary fluvial systems. The abrupt facies changes bounding stratigraphic units are related to base level changes in relation with regional climatic events, but modified locally by salt tectonics. Climatic as well as tectonic-driven variations at a regional scale modify the rate and style of sediment supply and the regional subsidence, which are recorded in a coeval manner by the fluvial system and shallow marine system in each mini-basin. In contrast, the salt tectonic modify locally sedimentary record and associated stratal pattern within each mini-basin, for a given stratigraphic unit.

### 3.11.5 (o) The Central High Atlas in Morocco : a snapshot of a Jurassic diapiric rifted basin

Eduard Saura<sup>1</sup>, Jaume Vergès<sup>1</sup>, Grégoire Messenger<sup>1,2</sup>, Juan Diego Martin-Martin<sup>1</sup>, Mar Moragas<sup>1</sup>, Philippe Razin<sup>3</sup>, Carine Grélaud<sup>3</sup>, Rémi Joussiaume<sup>3</sup>, Manon Malaval<sup>3</sup>, David W. Hunt<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Group of Dynamics of the Lithosphere, Institute of Earth Sciences  
Jaume Almera Barcelona, Espagne

<sup>2</sup>Statoil, Bergen, Norvège

<sup>3</sup>ENSEGID, Pessac

The Central High Atlas in Morocco exposes an inverted Triassic-Jurassic rift basin with major ENE-WSW northern and southern compressive boundaries. Internally, the Moroccan High Atlas is constituted by long and continuous NE-SW trending ridges (anticlines), which are oblique to the present limits of the compressive range. Most of these ridges show Triassic argillites, evaporites and basalts in their cores, which are commonly intruded by Jurassic gabbros. Typically, these ridges show strongly dipping and subparallel flanks and in most cases showing different Jurassic stratigraphic sequences on each limb. Bed thinning, onlaps, truncations and/or sedimentary facies changes decreasing in paleowater depth towards the axis of the ridges are also characteristic features.

We interpret these structural ridges as linked to elongated diapiric walls and coeval sedimentation as halokinetic. Some of these diapiric walls

are welded diapirs. The interpretation of geological maps, confirmed by remote sensing mapping and fieldwork, indicates a secondary NW-SE trending system of diapir walls and welds. These are interfering with the major NE-SW system resulting in a polygonal pattern of thick Jurassic minibasins. While some diapiric structures like the Tazoult ridge were partially inactive during the earliest Middle Jurassic, migration of mobile material continued through Middle-Upper Jurassic times developing 2-3 km-thick sedimentary minibasins in the Imilchil region (Lake Plateau and Ikkou minibasins). This diapiric region in High Atlas may represent a well-exposed example of Jurassic diapiric growth reported in the Atlas in Algeria and Tunisia but buried at depth.

### 3.11.6 (o) Taux de déformation du Miocène à l'Holocène sur le piémont Sud du Tian Shan, Chine

Amandine Sartégou<sup>1</sup>, Dimitri Saint-Carlier<sup>1</sup>, Benjamin Lauer<sup>1</sup>, Mathilde Baron<sup>1</sup>, Julien Charreau<sup>1</sup>, Jérôme Lavé<sup>1</sup>, Pierre-Henri Blard<sup>1</sup>, Stéphane Dominguez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier

Le Tianshan est une chaîne majeure située en Asie qui accommode une grande partie de la convergence entre les plaques indienne et eurasiatique. Il est donc important de quantifier dans le temps les taux de déformation à travers cette chaîne. Ses piedmonts sont des zones clés qui focalisent une partie importante du raccourcissement. Sur le piedmont Sud on observe plusieurs plis et chevauchements dont le pli de rampe de Quilitage.

Nous avons ainsi estimé l'histoire du raccourcissement à travers cette structure depuis le Miocène. Pour ce faire nous réalisons une modélisation cinématique du plissement qui s'appuie sur des données sismiques et des mesures structurales en surface qui contraignent précisément la géométrie du pli. Elle permet d'identifier nettement les sédiments syn-tectoniques et de quantifier, horizon par horizon, le raccourcissement nécessaire pour chacun à travers la structure étudiée. Cette approche a donc été appliquée sur trois sections pourvues de données suffisantes. Sur chacune, les âges de dépôts ont été contraints par des données magnétostratigraphiques publiées, et complétés, le cas échéant, par des âges d'enfouissement cosmogéniques <sup>26</sup>Al/<sup>10</sup>Be que nous avons réalisés. La répartition du raccourcissement moyen semblerait différente selon les coupes étudiées avec deux épisodes de raccourcissement comprenant une accélération après 1 Ma à l'ouest et une vitesse plus constante depuis 5 Ma sur la partie plus à l'est. Ces variations rendent potentiellement compte de la répartition du raccourcissement entre les différentes structures et des variations au sein-même de l'anticlinal. En marge de cette étude, sur la coupe centrale, nous avons également réalisé des datations <sup>26</sup>Al/<sup>10</sup>Be de la base de la formation conglomératique de Xiyu. Ces âges, moyennent une restauration de la déformation, permettent d'estimer la vitesse de progradation sédimentaire dans le bassin d'avant-pays. Celle-ci permet d'apporter de nouvelles contraintes sur les vitesses de raccourcissement à travers le piedmont.

### 3.11.7 (p) Forçage orbital vs. tectonique dans le Bassin d'avant-pays de Jaca (Zone Sud-pyrénéenne) : le cas des alternances marno-calcaires de Guara et des turbidites de Hecho (Éocène)

Romain Rubi<sup>1</sup>, Mathieu Martinez<sup>1</sup>, Charles Aubourg<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau

Le bassin d'avant-pays de Jaca correspond à un bassin en piggy-back, dans la zone Sud-Pyrénéenne, soumis à l'influence de l'orogénèse pyrénéenne depuis l'Éocène jusqu'au Miocène. Une étude cyclostratigraphique a été entreprise sur la coupe de la Boltaña au contact entre les alternances marno-calcaires terminant la formation de Guara et les turbidites de Hecho, avec pour objectif de déterminer l'origine des alternances lithologiques de chacune de ces formations.

Les alternances de la formation de Guara sont constituées d'une succession rythmique entre les marnes et des calcaires mudstones, déposés en milieu offshore. Des mesures de susceptibilité magnétique (SM) sont effectuées tous les 20 cm sur ces alternances. La série de SM est ensuite traitée par analyses spectrales dérivant de la transformée de Fourier en vue d'en détecter les cyclicités sédimentaires. L'excentricité (100 ka) et la précession s'y expriment de façon dominante, permettant d'estimer un taux de sédimentation fluctuant entre 35m/Ma et 75 m/Ma dans cette portion de la coupe.

Les turbidites de Hecho sont constituées d'alternances entre une sédimentation événementielle constituée de banc gréseux à conglomératiques et une sédimentation plus continue constituée de silts. L'analyse spectrale menée sur la série de SM ne permet pas de rattacher les rythmicités sédimentaires à un forçage orbital, confirmant leur origine tectonique. Néanmoins une cyclicité à ~6 m se détache de l'analyse spectrale et pourrait correspondre à l'enregistrement de la précession, déjà observée dans le bassin (Kodama et al., 2010). Les paramètres de l'orbite terrestre pourraient influencer sur cette formation turbiditique en modulant les apports en sédiments terrigènes fins vers le bassin.

Référence :

Kodama, K.P., Anastasio, D.J., Newton, M.L., Pares, J.M., Hinnov, L.A., 2010. High-resolution rock magnetic cyclostratigraphy in an Eocene flysch, Spanish Pyrenees. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 11, Q0AA07.

### 3.11.8 (p) Analyse de la Déformation Récente en Manche Orientale : Résultats préliminaires de la campagne « TREMOR »

Virginie Gaullier<sup>1</sup>, Anne Duperré<sup>2</sup>, Olivier Averbuch<sup>1</sup>, Frank Chanier<sup>1</sup>, Antoine Frère<sup>3</sup>, Fabien Graveleau<sup>1</sup>, Hervé Jomard<sup>4</sup>, Pascal Le Roy<sup>5</sup>, Fabien Paquet<sup>6</sup>, Christophe Prunier<sup>5</sup>, Bruno Vendeville<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosystèmes, Lille

<sup>2</sup>LOMC, Le Havre

<sup>3</sup>DAM Île-de-France, CEA Bruyères-le-Châtel

<sup>4</sup>IRSN, Fontenay aux Roses

<sup>5</sup>LDO, Plouzané

<sup>6</sup>BRGM, Orléans

Le projet « TREMOR » (Tectonique REcente en Manche ORientale) s'inscrit dans une problématique générale visant à mieux identifier et caractériser les systèmes fracturés qui se développent sur le plateau continental de la Manche, dans la continuité des structures tectoniques reconnues à terre dans le bassin anglo-parisien en Haute-Normandie, Picardie et Nord-Pas de Calais. La campagne prospective « TREMOR » qui s'est déroulée du 1er au 15 juin 2014 à bord du N/O « Côtes de la Manche », avait pour but d'initier un projet plus vaste, d'envergure trans-régionale avec une approche couplée terre-mer. L'objectif général est d'améliorer le schéma structural régional, de mieux quantifier le style, la continuité sous-marine et le calendrier de déformation des grands accidents structuraux trans-Manche (Failles du Bray et de la Somme), de mieux cartographier la géométrie de contact entre les dépôts mésozoïques et tertiaires au large de la Picardie, et d'améliorer la connaissance des structures faillées en comparant leur localisation avec les catalogues de sismicité relocalisée. L'acquisition de données sismiques THR Sparker permet : i. Au large de Dieppe, de cartographier précisément le prolongement en mer de la faille du Bray et son environnement ; ii. Au large

du Tréport/Le Touquet, de caractériser le contact entre les dépôts de la craie mésozoïque du Nord du Bassin de Paris et les dépôts cénozoïques du bassin de Dieppe-Hampshire ; iii. Au niveau des structures identifiées, de détecter d'éventuelles déformations des dépôts quaternaires. Grâce à ces nouvelles données, nous espérons contribuer à une meilleure connaissance du bâti structural et de la déformation tectonique récente de ce secteur, soumis à une activité sismique historique et ainsi apporter de nouvelles contraintes en termes d'évaluation des risques sismiques et gravitaires, en particulier au niveau de zones particulièrement sensibles comme les centrales nucléaires de Paluel et Penly, situées sur la côte de Haute-Normandie.

### 3.11.9 (p) Mise en place et évolution des évaporites du bassin de Sivas (Turquie)

Alexandre Pichat<sup>1,2</sup>, Guilhem Hoareau<sup>2</sup>, Jean-Marie Rouchy<sup>3</sup>,  
 Charlotte Ribes<sup>1,2</sup>, Charlie Kergaravat<sup>1,2</sup>, Jean-Paul Callot<sup>2</sup>,  
 Jean-Claude Ringenbach<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>2</sup>LFC-R, Pau

<sup>3</sup>MNHN, Paris

La partie centrale du Bassin Oligo-Miocène de Sivas (Turquie) est affecté par une tectonique salifère intense, initiée à partir d'une épaisse accumulation d'évaporites (formation Hafik, Oligocène moyen). Cette tectonique salifère a contribué au développement de mini-bassins continentaux à marins aujourd'hui basculés et isolés par des murs de sel et/ou sutures. Les mini-bassins continentaux sont eux-mêmes fréquemment comblés par des évaporites dépositionnelles en plus des faciès gréseux dominants.

Nous présentons ici les caractéristiques faciologiques et les mécanismes de mise en place des différents types d'évaporites dépositionnelles rencontrés dans les mini-bassin. Nous montrons en particulier que les faciès évaporitiques sont de deux types :

- Ceux associés à des processus de dépôt clastique (gypsarénites et conglomérats).

- Ceux associés à une précipitation in situ principalement en contexte de playa ou sebkha.

Ces évaporites sont fréquemment en contact direct avec des murs de sel ou même de glaciers de sel. Ces observations, ajoutées à l'étude pétrographique des évaporites, suggèrent que ces dépôts sont probablement dérivés d'une remobilisation des structures diapiriques affectant le bassin suite à leur mise à l'affleurement, via leur démantèlement mécanique (gypsarénites) et/ou des processus d'altération chimique (dissolution). Des données isotopiques (S, O, Sr) sont en cours d'acquisition pour confirmer cette interprétation.

Par ailleurs, ces évaporites de seconde génération se sont parfois directement accumulées au toit d'émissaires diapiriques, sur plusieurs centaines de mètres. Ces accumulations ont ainsi formé de véritables mini-bassins salifères de seconde génération, eux même affectés par des déformations caractéristiques de la tectonique salifère. Plusieurs cas d'étude permettront d'illustrer ces déformations.

### 3.11.10 (p) Fracture and porosity networks of reservoir rocks in salt-driven mini-basins

Charlie Kergaravat<sup>1,2</sup>, Jean-Paul Callot<sup>1</sup>, Charles Aubourg<sup>1</sup>, Julien Charreau<sup>3</sup>, Jean-Claude Ringenbach<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>3</sup>CRPG, Nancy

The quality of reservoir rocks in salt-driven mini-basin is governed primarily by the fracture and the porosity networks. As mini-basins are framed by evaporites, the stress conditions during basin evolution might be different to those which prevailed from those active in classic basins. We studied the fracture and the porosity networks of two salt controlled mini-basins developed in compressional setting in Turkey, the ~4 km thick Emirhan mini-basin and the ~6 km thick Karayün mini-basin.

We measured extensively the fracture network in two mini-basins, where 40 sites have been acquired in fluvial sediment distributed in the core and along the edges of the mini-basins. At first glance, both mini-basins display similar fracture network of pre-tilt fractures. In both mini-basins, we observed an early N-S fracture network, perpendicular to the bedding and parallel to the regional shortening. It is followed by a second set of mainly E-W fractures expressed preferentially in the border of the mini-basin, associated with the halokinetic-sequence formation.

We measured the magnetic fabric of 135 samples from sandstones to siltstones rocks from both Emirhan and Karayün mini-basins. In clastics rocks, magnetic fabric provides a reasonable portrait of petrofabric, and by extension, information about the pore network. In the Karayün mini-basin, where bedding is gently dipping (~30°), the magnetic fabric reveals the prevalence of sedimentary fabrics, with little indication of strain imprint, suggesting that these rocks experienced only vertical compaction. In this mini-basin, the pore network is primarily controlled by depositional and burial processes. In contrast, the magnetic fabric from the Emirhan mini-basin reveals a pre-tilt horizontal N-S compaction. In some occurrences, the magnetic foliation develops perpendicular to the bedding. We assume therefore that the pore network in the Emirhan mini-basin is controlled both by vertical compaction (burial) and by horizontal tectonic compaction prior to tilting.

The comparison of meso-scale and micro-scale elements suggests that the two mini-basins behave differently. While both mini-basins record pre-tilting fracture, only the 90° tilted Emirhan mini-basin record significant lateral compaction expressed by matrix damage.

### 3.11.11 (p) Apport de la modélisation analogique sous scanner-X à la caractérisation des interactions tectonique/sédimentation en domaine salifère : application au Golfe du Mexique et au bassin de Sivas (Turquie)

Romain Darnault<sup>1</sup>, Charlie Kergaravat<sup>2,3</sup>, Jean-Paul Callot<sup>3</sup>, Jean-François Salel<sup>4</sup>, Jean-Marc Daniel<sup>1</sup>, Charlotte Ribes<sup>2,3</sup>, Jean-Claude Ringenbach<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>3</sup>LFC-R, Pau

<sup>4</sup>Cobalt Energy, Houston, États-Unis

La modélisation analogique, imagée en 3D par tomographie sous scanner-X, est un très bon outil pour étudier l'évolution de structures géologiques complexes. Ce travail se concentre sur une série d'expériences simulant le développement de minibassins en contexte salifère, afin d'imager finement les interactions entre la tectonique et la sédimentation, ainsi que les géométries des structures verticales difficilement imagées par la sismique. Les structures obtenues sont analogues des mini-bassins du Golfe du Mexique (GOM), imagés en sub-surface, et de ceux affleurant dans le bassin de Sivas.

Les expériences ont été réalisées dans une boîte dans laquelle un piston motorisé permet la déformation (par compression dans ces expériences). Un niveau ductile de silicone ayant des propriétés mécaniques similaires à une couche d'évaporites a été déposé sur une géométrie de socle prédéfinie. Une série sédimentaire matérialisée par une succession

de sable, pyrex et corindon est déposée progressivement sur le niveau ductile de silicone. Le chargement hétérogène de couches sédimentaires sur la silicone est à l'origine du développement de structures salifères et de séquences halocinétiques. L'application d'un raccourcissement permet d'accentuer le fluage de la silicone et d'amplifier localement les interactions avec la sédimentation.

L'élaboration de ces modèles analogiques a permis :

- (i) De tester l'impact d'une géométrie de socle sur l'évolution de tels systèmes
- (ii) De tester l'impact de différents taux de compression sur ces systèmes salifères
- (iii) D'imager en 3D l'évolution de structures salifères et le développement de séquences halocinétiques le long des bordures des mini-bassins.
- (iv) D'observer le timing de la subsidence des mini-bassins.

### 3.11.12 (p) Impact of synkinematic sedimentation on the geometry and dynamics of compressive growth structures : Analogue modelling insights

Laurie Barrier<sup>1</sup>, Thierry Nalpas<sup>2</sup>, Denis Gapais<sup>2</sup>, Jean-Noël Proust<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>Géosciences Rennes

Analogue sandbox models have been set up to study the impact of synkinematic deposits on the geometry and evolution of single thrusts and folds according to different sedimentation modes (a slow or rapid sedimentation rate that is constant or changing in space and time) and rheological profiles (thin or thick sedimentary series, with a basal décollement level or not). A first series of experiments documents the influence of synkinematic deposits according to their sedimentation rate and the rheology of the prekinematic materials. A second series investigates the influence of changes in the sedimentation rate through time. A third one considers the influence of changes in the sedimentation rate in space.

All these experiments suggest that the geometry and evolution of single compressive growth structures vary according to the sedimentation rate. The number and dip of their frontal thrust segments change with the ratio R between the sedimentation rate (Vsed) at the footwall of the faults and the uplift rate (Vupl) of their hanging wall. The latter is then more or less uplifted depending on the dip of the thrusts. As a result, the overall structure has either a fault-bend fold or a fault-propagation fold geometry. Those rules are verified when the ratio R (Vsed/Vupl) changes in space or through time. In addition, the rheological profile of the models also affects the geometry and evolution of compressive growth structures. Their structural style, as well as the synsedimentary splitting and steepening of the associated thrusts, varies according to the occurrence and strength of the brittle and ductile layers.

According to this modelling study, the ratio R (Vsed/Vupl) and its changes in space and time, along with the rheology of the deformed materials, are key parameters to better understand the geometrical and kinematical complexities of natural growth thrusts and folds and to improve their interpretation.

### 3.11.13 (p) Interaction between deformation and sedimentation in a multidecollement thrust zone : Analogue modelling and application to the Sub-Andean thrust belt of Bolivia

Lena Driehaus<sup>1</sup>, Thierry Nalpas<sup>1</sup>, Jean-François Ballard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

Fold and thrust belts are influenced by the presence of décollement levels, as well as the amount of shortening and synkinematic sedimentation. These parameters are studied at the scale of a thrust belt using a field approach, combined with analogue and numerical modelling. In this study, we use analogue modelling to test the evolution of a single structure during sedimentation in a domain containing three prekinematic décollement levels. The development of this structure in the analogue experiments shows that the expression of the deformation is strongly dependent on sedimentation rate : (i) the structure propagates forward in an overall asymmetric shape if the sedimentation rate is slower than the uplift velocity, or (ii) the structure grows vertically and its vergence changes at the surface if the sedimentation rate is similar to the uplift velocity, or (iii) the structure grows vertically with a double vergence at the surface and at depth if the sedimentation rate is higher than the uplift velocity. The results of the experiments are compared with structures in the Subandean thrust belt to aid the interpretation of poor seismic data.

### 3.11.14 (p) 3D Geometry of normal faults in a rheologically layered system : Analogue modelling and seismic examples

Lina Vasquez<sup>1,2</sup>, Thierry Nalpas<sup>2</sup>, Jean-François Ballard<sup>1</sup>, Olivier Dauteuil<sup>2</sup>, Brendan Simon<sup>1,2</sup>, Xavier Du Bernard<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau*  
<sup>2</sup>*Géosciences Rennes*

Geometry of normal faults, within the sedimentary cover, may be influenced by different parameters such as the presence, position and efficiency of décollement levels, the amount, direction and velocity of extension, and the rate of synkinematic sedimentation. These parameters have already been studied at different scales in field approach, analogue and numerical modelling. The effect of several décollement levels has been studied at lithospheric scale to better understand the deformation processes between surface and depth. At the scale of single structure in a sedimentary basin, previous analogue modelling only studied the effect of a determined geometry of a fault on the synkinematic sedimentation. Here we used analogue modelling to analyse the 3D geometry of a single structure in a domain with three prekinematic décollement levels, analogue of salt, shale or under-compacted level. These experiments result in flat and ramp geometry in relation with décollement level and the pattern of the deformation depends here mainly on the velocity and amount of extension. The results of the experiments were compared to seismic examples in order to better interpret typical fault setups. One of the key points is that the geometry of normal faults displays large variations both in direction and dip, only in pure extensive regime, related to the presence of décollement levels, and not associated with any global/regional variation of extension direction.

### 3.12 Processus de transfert dans les failles : peut-on réconcilier les différentes échelles temporelles impliquées ?

(Transfer processes in faults : can we bridge the various time scales ?)

**Responsables :**

- Jean-Marc Daniel (IFP Energies Nouvelles)  
jean-marc.daniel@ifpen.fr
- Jean-Pierre Gratier (ISTerre, Grenoble)  
jean-pierre.gratier@ujf-grenoble.fr
- Mai-Linh Doan (ISTerre, Grenoble)  
mai-linh.doan@ujf-grenoble.fr

**Résumé :**

Les failles sont des objets géologiques complexes qui ont un impact important sur beaucoup de processus de transferts dans la croûte. Les études concernant ces transferts et leurs conséquences se focalisent généralement sur une échelle particulière de par la méthode d'observation ou le phénomène étudié. L'objectif de cette session est d'offrir un espace pour promouvoir des échanges autour de la mise à l'échelle temporelle et spatiale des phénomènes associés à ces transferts. Pour cela, elle est ouverte aux travaux décrivant les phénomènes transitoires associés à la sismicité, la déformation et les circulations de fluides le long des failles et aux travaux décrivant les interactions failles/fluides aux grandes échelles de temps (développement de l'architecture d'une zone de failles, histoire de la cimentation, géométrie des réseaux de failles,...). Les présentations de nouvelles méthodes d'analyse et de modélisations numériques adressant spécifiquement la problématique d'échelle temporelle sont également particulièrement encouragées.

**Abstract :**

Faults are complex geological objects that strongly control many transfer processes in the crust. The studies of these transfer processes and their consequences are generally focussed on a specific scale constrained by the observation method or the studied process itself.

The objective of this session is to promote exchanges around temporal and spatial scaling issues concerning transfer processes in fault zone. It is therefore open to presentation describing transient phenomena associated to seismic events, deformation and fluid movements along faults and to work describing fluid/faults interaction at long time scale (fault architecture development, cementation history, fault network geometry).

The presentation of new analytical methods and numerical models addressing specifically the problem of time scaling are specifically encouraged.

### 3.12.1 (o) Argiles néoformées dans les failles : minéralogie des argiles et datation 40Ar/39Ar des illites authigéniques.

Jacinthe Caillaud<sup>1</sup>, Philippe Munch<sup>2</sup>, Adrien Romagny<sup>3</sup>, Nicolas Arnaud<sup>2</sup>, Patrick Monié<sup>2</sup>, Michel Corsini<sup>3</sup>, Bruno Lanson<sup>4</sup>

<sup>1</sup>LOG, Wimereux

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier

<sup>3</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>4</sup>ISTerre, Grenoble

Les réactions minérales relatives à la fracturation cassante ont été reconnues comme étant un processus important dans les zones de faille. Lors du (re)jeu d'une faille, deux processus interviennent pour former la gouge argileuse : une fragmentation rapide de l'encaissant et la dissolution sous pression. Deux composantes principales de nature et de granulométrie différentes se distinguent alors dans la faille : (1) des clastes (micas hérités) et une matrice argileuse authigène (illites). Leur différenciation est basée sur l'identification du polytypisme de ces minéraux argileux. Le polytype 2M1 est interprété comme étant l'illite détritique (formée >280°C) alors que la formation du polytype 1M/1Md (<200°C) serait synchrone à la formation de la gouge.

La présence de reliefs élevés en bordure de la mer d'Alboran traduit des phénomènes tectoniques récents, pour la plupart d'âges Néogène à actuel. Pour préciser la déformation cassante, des matériaux argileux provenant de failles tardives ont été échantillonnés au Maroc sur trois sites distincts du SE vers le NW (Jebha, Cabo Negro, Ceuta) en vue d'étudier le potentiel des minéraux argileux de ces failles.

Les gouges sélectionnées en fonction de la présence significative d'illites ont été désolidarisées par des cycles successifs de chauffage/congélation et les suspensions de gouge obtenues ont été ensuite séparées en plusieurs fractions granulométriques. Sur chaque fraction, des diffractogrammes de rayons X sur poudres désorientées et dépôts orientés ainsi que la modélisation de ces données ont permis de distinguer la nature des argiles présentes dans les gouges, de quantifier leurs proportions, d'identifier l'ensemble des raies spécifiques aux polytypes d'illites et de démontrer la néoformation d'illites en quantité significative pouvant être liée à l'activation de la faille. Deux fractions ont été datées par la méthode 40Ar/39Ar.

### 3.12.2 (o) Interactions fluide-roche et minéralisations syntectoniques le long du chevauchement du Pic de Port Vieux (Pyrénées)

Vincent Trincal<sup>1</sup>, Martine Buatier<sup>1</sup>, Delphine Charpentier<sup>1</sup>, Pierre Lanari<sup>2,3</sup>, Brice Lacroix<sup>3</sup>, Pierre Labaume<sup>4</sup>, Manuel Munoz<sup>5</sup>, Abdeltif Lahfid<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Chrono-Environnement, Besançon

<sup>2</sup>Institute of Earth Sciences University of Bern, Suisse

<sup>3</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, University of Michigan, Ann Arbor, États-Unis

<sup>4</sup>Géosciences Montpellier

<sup>5</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>6</sup>BRGM, Orléans

Dans les ceintures orogéniques, le raccourcissement est principalement accommodé par des failles chevauchantes qui peuvent constituer des voies préférentielles pour la circulation de fluide. Le Pic de Port Vieux est un chevauchement lié à celui de Gavarnie (Zone Axiale des Pyrénées). Il juxtapose des pélites du Trias sur des calcaires Crétacé. Les pélites sont recoupées par de nombreuses veines cisailantes et extensives associées à la mise en place du chevauchement et remplies par des assemblages à chlorite et quartz. Dans le but d'étudier les transferts

élémentaires induits par la déformation et les circulations de fluides, un échantillonnage a été réalisé le long d'un transect traversant le toit, le mur et le cœur de la zone de faille. Les analyses isotopiques des calcaires montrent un gradient en  $\delta 18\text{OVPDB}$  (de -5.5 à -14‰) lié à la mylonitisation lorsqu'on se rapproche du chevauchement. Les températures estimées par spectroscopie Raman (graphitisation du carbone) sont quant à elles constantes. Ces résultats sont compatibles avec les observations en cathodo-luminescence et suggèrent une recristallisation dynamique des carbonates dans un système ouvert aux fluides. Les observations microscopiques (MEB) des pélites, couplées à des analyses chimiques (XRF) et des quantifications minérales (Affinement Rietveld) ont permis de montrer que quartz, muscovite 2M1, chlorite (clinocllore), calcite et rutile sont présents dans tous les échantillons, en revanche l'hématite est absente dans le cœur de la zone déformée. L'état d'oxydation du fer dans la roche totale et sur les chlorites syncinématiques a été mesuré respectivement par spectroscopies Mössbauer et  $\mu\text{X}$ anes. Ces données suggèrent que le cœur de la faille chevauchante a interagi avec un fluide réducteur induisant la dissolution de l'hématite et la précipitation de chlorite dans les veines cisailantes et extensives. Les calculs thermodynamiques à partir des analyses microsonde et  $\mu\text{x}$ anes sur les chlorites suggèrent des températures de formation proches de 300°C pour un Fe3+/Fetotal d'environ 0,35. Dans certaines veines extensives, des chlorites atypiques avec une zonation oscillatoire ont été étudiées plus particulièrement dans le but de comprendre l'origine de ces zonations et leur lien avec les circulations fluides.

### 3.12.3 (o) Interactions entre processus de fracturation et de cicatrisation et conséquences sur l'évolution des propriétés rhéologiques et de transfert des failles : approches expérimentales et naturelles

Jean-Pierre Gratier<sup>1</sup>, Francois Renard<sup>1,2</sup>, Julie Richard<sup>1</sup>, Mai-Linh Doan<sup>1</sup>, Benjamin Vial<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>Physics of Geological Processes, Oslo, Norvège

L'observation des failles dans la croûte supérieure montre l'interaction entre des mécanismes de fracturation et de cicatrisation associés aux processus de rupture et de fluage transitoire ou permanent, avec transferts de matière et circulations épisodiques de fluides. Cette interaction entre fracturation et cicatrisation conduit à l'évolution des propriétés rhéologiques et de transfert des failles lors de processus à différentes échelles de temps : (i) le temps du cycle sismique (années à millénaires) associant rupture, fluage et cicatrisation post-sismique et (ii) le temps de la localisation des déformations (millions d'années) conduisant à des transformations progressives des roches des failles et à des ségrégations de leurs propriétés rhéologiques et de transfert. Cette interaction entre fracturation et cicatrisation conditionne également les transferts de matière à différentes échelles d'espace : du transfert par diffusion à l'échelle des grains (fluage par dissolution cristallisation sous contrainte, cicatrisation) à des circulations à l'échelle des massifs (colmatage, transformations métamorphiques et évolution de friction). La compréhension de ces processus passe par une approche couplée d'expérimentation (cinétique des processus et relations contrainte - déformation) et d'analyse des structures naturelles (nature des minéraux et des fluides, géométrie des chemins de transfert, conditions thermodynamiques de la déformation).

Des résultats sont présentés qui montrent la possibilité de reproduire au laboratoire par des essais d'indentation les processus du cycle sismique (fracturation - fluage - cicatrisation) et les processus de localisation de la déformation (développement de litages). En parallèle, des observations sur des failles naturelles permettent d'évaluer les paramètres de

l'évolution de ces processus dans le temps qui affectent la rhéologie et la perméabilité des failles, de l'échelle du cycle sismique à celle des transformations géologiques.

### 3.12.4 (o) Strain Localization Processes In Shear Zones : Mass Balance Calculations, Phase Diagrams And Microstructural Integrated Studies

Emilien Olliot<sup>1</sup>, Philippe Goncalves<sup>2</sup>, Jean-Charles Poilvet<sup>2</sup>, Didier Marquer<sup>2</sup>, Karel Schulmann<sup>1,3</sup>, Cyril Durand<sup>4</sup>

<sup>1</sup>IPG Strasbourg

<sup>2</sup>Chrono-environnement, Besançon

<sup>3</sup>Centre for Lithospheric Research, Prague, République tchèque

<sup>4</sup>Géosystèmes, Lille

Shear zones (SZ) are the results of the interplays between mechanical and chemical processes and they enhance strain localization processes. Fluid-assisted chemical mass transfers, reaction softening and different types of deformation mechanisms significantly control the bulk rock rheology. In this review, four examples of multi-scale discontinuities in granites are presented to emphasize the following results :

- SZ nucleation in a brittle regime in blueschist facies conditions reveals that fluid-assisted mass transfers, reactions softening and creep plasticity occur at the first step of the SZ formation.

- Chemical mass transfers and fluid flow widely occur during SZ formation : for example, chemical mass transfers in a greenschist facies SZ consist of gains of +125% of MgO, +25% of K<sub>2</sub>O and +90- Equilibrium phase diagrams (pseudosections) allow the refinement of P-T-X-fl conditions in metagranites, highlighting the role of metasomatic processes on SZ formation. Large gains of MgO and H<sub>2</sub>O coupled to a huge loss of CaO are related to the stabilization of phengite and chlorite in greenschist facies conditions, whereas gains of CaO and H<sub>2</sub>O are associated to the crystallization of phengite and oligoclase in amphibolite facies conditions.

- Deformation mechanisms also control the rheology of SZ : for example in amphibolite facies conditions, a competition between activities of fluid-assisted granular-flow in plagioclase-micas layers and dislocation creep in Qtz- and Kfs-layers is well-documented during SZ formation. This review of SZ integrated studies allows a better understanding of the strain localization processes and fluid flow in the continental lithosphere.

### 3.12.5 (p) Développement et propriétés des fractures dans les systèmes argilo-calcaires

Muriel Rocher<sup>1</sup>, Vincent Roche<sup>2</sup>, Catherine Homberg<sup>3</sup>, Yves Missenard<sup>4</sup>

<sup>1</sup>IRSN, Fontenay-aux-Roses

<sup>2</sup>Department of Physics, Edmonton, Canada

<sup>3</sup>ISTeP, Paris

<sup>4</sup>GEOPS, Orsay

La présente étude s'inscrit dans le cadre de l'évaluation par l'IRSN de la sûreté à long terme d'un stockage géologique de déchets de haute activité et de moyenne activité et à vie longue. En appui de son expertise, l'IRSN mène des actions de recherche pour comprendre et modéliser les phénomènes importants qui contrôlent l'évolution du stockage. Un tel stockage est actuellement envisagé dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien (COX) d'épaisseur hectométrique, encadrée par des formations calcaires et étudiée par l'Andra notamment dans le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne à 500m de profondeur.

Les propriétés favorables des formations argileuses pour le confinement des radionucléides, en particulier leurs caractéristiques pétrophysiques et leur capacité de rétention des radionucléides, sont à l'origine de ce choix pour l'implantation d'une installation de stockage. Néanmoins, il convient de s'assurer que leur capacité de confinement ne serait pas amoindrie par de la fracturation (d'origine tectonique ou anthropique) au sein du COX qui créerait des chemins préférentiels de transfert des radionucléides vers la surface. Des études menées par l'IRSN ont montré que les méthodes géophysiques classiques ne permettent pas la détection des failles à faible rejet vertical dans des formations argileuses épaisses, au contraire des formations calcaires. Des investigations de terrain, de laboratoire et de modélisation numérique portant sur l'architecture et les propriétés des fractures, notamment des failles, dans des analogues d'alternances argilo-calcaires (Bassin du SE de la France et archipel maltais) ont permis d'acquérir une meilleure connaissance de leurs mécanismes de développement dans ces alternances. Ces résultats permettent de préciser dans quels cas une faille qui serait identifiée par géophysique dans une couche calcaire pourrait aussi affecter la couche argileuse adjacente ainsi que de préciser ses caractéristiques géométriques et hydrauliques.

## Thème 4

# Pyénées - *Pyrenees*

Animateurs : Michel de Saint Blanquat (GET, Toulouse), Charles Aubourg (LFC-R, Pau)

### 4.1 Pollutions et environnements pyrénéens

#### Responsables :

- David Amouroux (LCABIE-IPREM, Pau)  
david.amouroux@univ-pau.fr
- Gael Leroux (EcoLab, Toulouse)  
gael.leroux@ensat.fr
- Jesús Miguel Santamaria (Univ. Navara, Pampelune, Espagne)  
chusmi@unav.es
- Jean-Christophe Auguet (EEM-IPREM, Pau)  
jeanchristophe.auguet@univ-pau.fr

#### Résumé :

Les zones de montagne sont extrêmement sensibles aux évolutions environnementales, qu'elles soient liées au changement climatique, aux activités humaines passées et actuelles (mine, industrie, tourisme, transport routier ...), ou aux dépôts atmosphériques dus au transport de polluants à longue distance et aux émissions locales. Le suivi et la compréhension du fonctionnement biogéochimique des écosystèmes montagnards, véritables sentinelles des changements environnementaux, restent encore très limités. Ces connaissances doivent être améliorées afin de proposer et garantir une meilleure gestion durable de ces écosystèmes, souvent en tête de bassin versant. C'est particulièrement le cas des Pyrénées, principalement à cause du manque qualitatif et quantitatif de données environnementales intégrées.

#### 4.1.1 *Keynote communication* : Pyrenean lakes : indicators and recording systems of long-term, long-range atmospheric pollution and its present day effects

Lluís Camarero<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre d'Estudis Avançats de Blanes, Girona, Espagne

In order to assess the effects that human activities have on nature at a global scale beyond the particular circumstances of each locality, it is necessary to monitor the so-called remote sites. In those sites, the local human impacts are far from being the main driver of natural ecosystem dynamics. One of such sites are high mountain areas, and within these, lakes are ecosystems specially useful to detect and record global changes. Their waters integrate the biogeochemical signal from the whole catchment, a signal that is recorded over time in their sediments. In this presentation, results from a 30-years continued research conducted at the Limnological Observatory of the Pyrenees (LOOP) using mountain lakes as sensors of global change will be presented, including topics such as trace metal pollution, disruption of the global N cycle, or climate change.

#### 4.1.2 (o) Impact of local and global metal contaminations on microbial communities of Pyrenean lakes

Jean-Christophe Auguet<sup>1</sup>, H  l  ne Moussard<sup>1</sup>, Mathilde Jeanbille<sup>1</sup>, Alberto De Diego Rodriguez<sup>2</sup>, Azibar Rodriguez-Iruretagoiena<sup>2</sup>, Ainara Gredilla<sup>2</sup>, Silvia Fernandez-Ortiz De Vallejuelo<sup>2</sup>, Pierre Galand<sup>3</sup>, Dimitri Kalenitchenko<sup>3</sup>, Jean-Luc Rols<sup>4</sup>, Oleg Pokrovsky<sup>5</sup>, Aridane G. Gonzalez<sup>5</sup>, Enrique Navarro Navarro<sup>6</sup>, Llu  s Camarero<sup>7</sup>

<sup>1</sup>EEM-IPREM, Pau

<sup>2</sup>UPV/EHU ; IBeA research group, Bilbao, Espagne

<sup>3</sup>LECOB, Banyuls-sur-Mer, France

<sup>4</sup>EcoLab, Toulouse

<sup>5</sup>GET, Toulouse

<sup>6</sup>Pyrenean Institute of Ecology, Zaragoza, Espagne

<sup>7</sup>Centre d'Estudis Avançats de Blanes, Girona, Espagne

Mountain lakes are both a natural heritage of the Pyrenean massif and natural receptors allowing the detection of global changes or anthropogenic contaminations. Recent studies showed that the integrity of this heritage is threatened either by metal deposition from the atmosphere, either by metal contamination from past mining activities. Unfortunately, to date no study has been undertaken to determine the consequences of such contaminations on the biodiversity and functioning of these ecosystems. Because of their critical ecological role in lake ecosystems (i.e. biogeochemical recycling of major nutrients), metal's impacts on microbial communities (ie Bacteria, Archaea and micro-eukaryotes) may potentially have system-wide implications. Hence, the primary goal of the work described here was to compare microbial community structures in water column and sediment samples collected from mountain lakes with differing levels of metal contamination. Our results showed that microbial assemblages were heavily impacted in terms of community structure and diversity in highly contaminated lakes.

Acknowledgments : This work has been financially supported by the Communaut   de Travail des Pyr  n  es (Research project No. CTP 2012/P08).

#### 4.1.3 (o) Sediments as sentinels of metallic pollution in high altitude lakes of the Pyrenees

Azibar Rodriguez-Iruretagoiena<sup>1</sup>, Ainara Gredilla<sup>1</sup>, Silvia Fedez-Ortiz De Vallejuelo<sup>1</sup>, Gorka Arana<sup>1</sup>, Juan Manuel Madariaga<sup>1</sup>,

Alberto De Diego Rodriguez<sup>1</sup>, Jean-Christophe Auguet<sup>2</sup>, H  l  ne Moussard<sup>2</sup>, Mathilde Jeanbille<sup>2</sup>, Pierre Galand<sup>3</sup>, Dimitri Kalenitchenko<sup>3</sup>, Jean-Luc Rols<sup>4</sup>, Oleg Pokrovsky<sup>5</sup>, Aridane G. Gonzalez<sup>5</sup>, Llu  s Camarero<sup>6</sup>, Enrique Navarro<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Department of Analytical Chemistry, University of the Basque Country, Bilbao

<sup>2</sup>EEM-IPREM, Pau

<sup>3</sup>LECOB, Banyuls-sur-Mer

<sup>4</sup>EcoLab, Toulouse

<sup>5</sup>GET, Toulouse

<sup>6</sup>Centre d'Estudis Avançats de Blanes, Blanes, Espagne

<sup>7</sup>Pyrenean Institute of Ecology, Zaragoza, Espagne

Sediments have been frequently used to monitor chemical pollution in different environments. The presence of metals in sediments from high altitude lakes in the Pyrenees may be natural (geochemical composition of the area) or anthropogenic (mining activities, long-term transport through the atmosphere,...).

In the framework of the CTP project No. CTP 2012/P03, surface sediments were sampled at 18 different high altitude lakes of the Pyrenees in a sampling campaign conducted in August/September 2013. Sediment cores were also collected in several of those lakes in order to investigate historical records of pollution. The concentrations of environmentally significant 24 elements were measured in the fine fraction (<63micra) of the dried samples.

#### 4.1.4 (o) Holocene and historical variations in atmospheric mercury deposition and isotopic composition inferred from two Pyrenean peatlands

Maxime Enrico<sup>1,2</sup>, Lars-Eric Heimb  rger<sup>2</sup>, Gael Le Roux<sup>1</sup>, Jeroen Sonke<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Ecolab, Toulouse

Peatlands integrate past atmospheric deposition and can be used as environmental archives. Previous investigations of mercury (Hg) accumulation rate (HgAR) in peat cores from different sites have highlighted an anthropogenic impact on Hg deposition, with enrichment factors in the range of 9-58 during the industrial period compared to pre-anthropogenic background. Because of the long residence time of Hg in the atmosphere (~6 months), even the most remote sites display increases in HgAR.

Peat cores from two Pyrenean peatlands were sampled and analyzed for Hg and Hg isotopic composition. The Pinet peat bog records the last 10,000 years of atmospheric deposition, and the Estibere minerotrophic peatland extends back to 1300 years BP. The two records displayed maximum HgAR during the industrial period, with enrichment factors in the range of previous studies (28 times for Pinet and 10-15 times for Estibere). The different amplitudes in enrichment factors can be related to the sampling sites, with Estibere being more remote and at a higher elevation than Pinet, which has been impacted by a local municipal solid waste incinerator.

The Hg isotopic composition displays significant shifts between pre-anthropogenic (10,000-4,000 years BP), pre-industrial (1750-1880 years AD) and industrial (post 1980 AD) periods. Anthropogenic Hg emissions are the most probable causes for these changes. All these results suggest that 1/ HgAR in peat archives is influenced by global and regional Hg deposition, 2/ Hg deposition is higher near local pollution sources, and 3/ an anthropogenic impact on Hg deposition occurred prior to industrialization.

#### 4.1.5 (o) Conséquences des activités hydroélectriques modernes sur le fonctionnement des écosystèmes lacustres : le cas de l'Étang Majeur (Observatoire Homme Milieu Pyrénées Haut Vicdessos, Pyrénées, France)

Anaëlle Simonneau<sup>1</sup>, Emmanuel Chapron<sup>1,2</sup>, Didier Galop<sup>1</sup>, Kazuyo Tachikawa<sup>3</sup>, Gaël Le Roux<sup>4,5</sup>, Edouard Bard<sup>6</sup>

<sup>1</sup>GEODE, Toulouse

<sup>2</sup>ISTO, Orléans

<sup>3</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>4</sup>EcoLab, Toulouse

<sup>5</sup>Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse

<sup>6</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

Dans le cadre de l'Observatoire Homme Milieu Haut Vicdessos (NE des Pyrénées), la sédimentation de l'Étang Majeur, situé dans la vallée des étangs de Bassiès à 1630 m d'altitude, est étudiée dans le but de comprendre l'évolution environnementale du système lacustre en lien avec l'implantation d'activités hydroélectriques depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle. Calibrée par l'échantillonnage des sols et des roches présents sur les versants, la caractérisation des constituants organiques et minéraux des séquences sédimentaires prélevées dans l'Étang permet de comparer un état anté-perturbation, correspondant au fonctionnement naturel du lac, avec un état post-perturbation, contemporain des activités hydroélectriques. L'ensemble des séquences a fait l'objet de datations via la mesure de radionucléides artificiels (<sup>137</sup>Cs, <sup>241</sup>Am) et naturels (<sup>210</sup>Pb, <sup>14</sup>C) qui permettent de contraindre les vitesses de sédimentation et de documenter la résilience de l'écosystème naturel face aux activités humaines actuelles. La sédimentation holocène apparaît riche en matière organique. Le palynofaciès quantitatif réalisé sur ces faciès démontre qu'ils sont de type dy (60% de matériel allochtone) et résultent de l'érosion des tourbes et des sols présents en amont du lac. Au sommet de chaque carottage, l'imagerie X, la microfluorescence X et la géochimie organique soulignent un changement abrupt de sédimentation, daté en AD1907±2; soit contemporain de la construction du barrage hydroélectrique et de la régulation du niveau d'eau de l'étang par la centrale hydroélectrique. Nos analyses démontrent que cette gestion anthropique de l'écosystème, et notamment le marnage qui lui est associé, affecte jusqu'à 37% de la surface lacustre, entraînant une forte remobilisation du matériel présent sur les berges. Les conséquences sur le fonctionnement biogéochimique de l'étang se manifestent (1) par un changement du niveau trophique vers un faciès de type gyttja (75% de matériel algaire), et (2) par un doublement du taux de sédimentation.

#### 4.1.6 (o) Les otolithes de salmonidés comme indicateurs de la géochimie du Sr :Ca, Ba :Ca et <sup>87</sup>Sr :<sup>86</sup>Sr dans les rivières pyrénéennes. Quels intérêts ?

Gilles Bareille<sup>1</sup>, Jean Martin<sup>2</sup>, Hélène Tabouret<sup>1</sup>, Alexandre Holub<sup>1</sup>, Sylvain Bérail<sup>1</sup>, Christophe Pécheyras<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LCABIE-IPREM, Pau

<sup>2</sup>Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture Bordeaux

Les otolithes sont des concrétions biominérales localisées dans l'oreille interne des poissons téléostéens. Elles croissent tout au long de la vie des poissons par dépôt de couches journalières d'aragonite (>90%) et d'une matrice de protéines (<8%). Les otolithes présentent la particularité d'incorporer des éléments chimiques dans les dépôts aragonite/protéines à partir du liquide présent dans le système de l'oreille

interne (endolymphe). Cette incorporation continue d'éléments chimiques est soumise aux variations de la composition chimique de l'endolymphe, variations dépendantes de la nourriture ingérée, des conditions physico-chimiques du milieu où réside le poisson (température, composition chimique de l'eau, salinité, ...), de l'affinité des éléments vis-à-vis de l'aragonite (rayons ioniques, charge), mais aussi du métabolisme du poisson.

En combinant des données géochimiques de différentes rivières pyrénéennes et des profils géochimiques sur des otolithes de saumon Atlantique (*salmo salar*) et de truites fario (*salmo trutta*), nous montrons que les rapports élémentaires Sr :Ca et Ba :Ca et le rapport isotopique <sup>87</sup>Sr :<sup>86</sup>Sr enregistrés sur l'otolithe reflètent les différences de substratum géologique observées entre rivières. Les signaux continus fournis par les otolithes ne témoignent cependant pas toujours de la variabilité temporelle géochimique de la rivière, probablement en raison de l'influence du métabolisme du poisson. Dans le cas où les signatures géochimiques propres à chaque rivière (ou groupes de rivières) sont suffisamment contrastées, alors les signatures élémentaires et isotopiques des otolithes s'avèrent très utiles pour identifier des déplacements entre affluents ou l'origine natale des poissons migrateurs comme le saumon et la truite de mer.

#### 4.1.7 Keynote communication : origin and vertical structure of ozone over western Pyrenees : new insights into atmospheric pollutants transport

Agustin Ezcurra<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dpto. Física Aplicada Facultad de Farmacia, Vitoria, Espagne

The Pyrenees Mountains, mostly an uninhabited area until recently, have suffered in the last decades a great increase in road traffic. Due to this fact, two research programs have been carried out in the area by laboratories from Spain and France. These two projects, PAP (Pollution Atmospheric in the Pyrenees) and PYNATEO (Pyrenean Network of Atmospheric Environmental Observatories), were conducted in 2003-2004 and 2011-2012 respectively. One of the main goals of both field research campaigns was to establish the pollution levels affecting the Pyrenees. Pollution measurements showed that the mean ozone concentration in the area increases with altitude, from values of about 30 ppb in lowest regions to 53 ppb at the Pic Midi observatory (2877 m high), the highest point where ozone was measured. SOM were used to determine the vertical structure of ozone concentration of passive samplers. Results showed that the concentrations followed a three-layer structure. In the first layer, below 1000 m ASL, ozone is produced by local precursors (such as automotive emissions) with mean concentrations of around 30 ppb. In this first layer, the diurnal cycle of ozone is always observed. Between 1000m and 1400 m ASL, an intermediate layer is found. In this layer, intrusions of ozone pollution coming from above are detected, increasing the ozone levels measured. Over 1400 m ASL (inside the Free Troposphere), a maximum mean concentration of ozone of 56 ppb was recorded. Here, the ozone measured is expected to be linked to remote sources that affect the area by means of long range transport. Apart from these results, it is important to note that the data clearly pointed to the existence of differences between the French and Spanish border that can play an important role in the dispersion of the ozone concentrations measured at the same altitude.

#### 4.1.8 (o) Wet deposition of trace elements over Vicdessos valley (Ariège Pyrenees, FRANCE) : Where do they come from ?

Adrien Claustres<sup>1</sup>, Anne Probst<sup>1</sup>, Gael Le Roux<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EcoLab, Toulouse

Human activities, especially those involving combustion processes, are known to disturb biogeochemical cycles of potentially harmful trace elements (PHTE) by the emission of aerosols enriched in those elements. The deposition of PHTE can occur far from emission sources, reaching remote ecosystems like mountains where they tend to accumulate in soils and wetlands. Since toxicity of such trace elements is partly associated with their concentration and speciation, it remains important to assess the contribution of added non-natural PHTE over ecosystems. In this study, specific attention will be given on the variability of PHTE (e.g. Pb, Cu, Zn, Ni, Cr, As, Sb, Tl) and other cations of natural origin (e.g. Al, Mg, K, Rb, Sr, Ba). This study aims to find the main factors influencing the variability of the deposition of trace metals.

A reference rain collector was installed at 1400 m a.s.l. and 4 other ones were disposed along a transect crossing a ridge (1600 - 2000 m a.s.l.). Bulk precipitation has been collected with NILU rain collectors twice a month. Separation of dissolved and particulate part was done by centrifugation (10000 rpm, 20 minutes). Samples were prepared following ultraclean procedures and analyzed for total PHTE and lithogenic elements using High Resolution and Quadrupolar ICP-MS. A Principal Component Analysis was performed on trace elements concentrations to assess the principal factors explaining the variability of concentrations. To estimate the anthropogenic enrichment in trace elements, Enrichment Factor (EF) was calculated.

Mean concentrations of elements occurred in this order  $K > Mg > A > Zn > Fe > Sr > Mn > Ba > Ni > Cu > Rb > Pb > Cr > Ti > As > Sb > Tl$ . PCA first axis, accounting for 61% of the variability, was highly correlated with major cations (Mg, Al, Ba) as well as As, Tl and Sb, and to a lower extent to Cu and Sr. This was associated with lower EFs of PHTE. According to hysplit backtrajectories and « red dust » found when centrifuging these samples, they were partly related to desert dust originating from Sahara or Spain. The second principal component, accounting for 13% of total data variability, was correlated with Cr, Ni, Pb and Cu to a lesser extent. Since these elements showed EFs 5 to 20 times higher during these events, this suggested another source of anthropogenic elements driving Pb, Zn, Cr and Ni concentrations.

#### 4.1.9 (o) The Pic du Midi Observatory - A new high altitude site for atmospheric Hg research

Nicolas Maruszczak<sup>1</sup>, Jeroen Sonke<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

The Pic du Midi Observatory in the French Pyrenees Mountains (2877m) was built in 1878. It is one of the oldest, permanently occupied astronomical, meteorological and atmospheric observatories well known for its ozone observations that have shown a five-fold increase since 1878. Since 2010 we have been adapting the atmospheric chemistry platform for Hg research. After climatizing lab space, and securing a pressurized argon supply and clean power, an automated Tekran Hg speciation system was installed indoors in 2011. A newly commercialized Tekran 1104 heated manifold supplies clean outside air to the inside 1130 module inlet. The manifold makes possible the year-round observation of atmospheric Hg speciation, even under extreme conditions of ice riming, -40°C and 150 km/h winds. A full year of Hg speciation observations shows the frequent (23) intrusion of free tropospheric air masses that are accompanied by gaseous oxidized Hg peaks up to 500 pg/m<sup>3</sup>. Hg speciation dynamics also depend strongly on meteorological conditions such as wind direction and cloud cover. In parallel to Hg speciation, we have been developing manual sampling methods for compound-specific stable isotopic composition (CSSIC). The isotope signatures of gaseous and particulate Hg species may inform on

the sources and transformations of Hg in the upper atmosphere. Hg speciation observations will be made available to the community through GMOS. Also, we have been deployed a cloud water sampler and a high volume sampler, to measure all trace metals and total suspended particles respectively. The Pic du Midi Observatory can host research teams for prolonged periods of time, under excellent living conditions. The goal of this presentation is to solicit researchers with an interest in the atmospheric chemistry of Hg or other related compounds to join us at the Observatory for new and innovative collaborative research efforts.

#### 4.1.10 (o) Les isotopes du Pb et du Hg comme outil d'identification des sources et des processus dans les lichens épiphytes de la plus grande hêtraie d'Europe (Forêt d'Iraty, Ouest des Pyrénées, France/Espagne)

Julien Barre<sup>1</sup>, Cristina Sola-Larrañaga<sup>2</sup>, Gaëlle Deletraz<sup>3</sup>, Sylvain Béraïl<sup>1</sup>, Emmanuel Tessier<sup>1</sup>, Hervé Pinaly<sup>1</sup>, David Elustondo Valencia<sup>2</sup>, Jesus Santamaria<sup>2</sup>, Alberto De Diego Rodriguez<sup>4</sup>, David Amouroux<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>LCABIE-IPREM Pau

<sup>2</sup>Universidad de Navarra, Pamplona, Espagne

<sup>3</sup>SET, Pau

<sup>4</sup>Department of Analytical Chemistry, Faculty of Science and Technology, University of the Basque Country, Bilbao, Espagne

Les écosystèmes de montagne sont des environnements fragiles et particulièrement sujets aux contaminations locales et globales. La forêt d'Iraty, plus grande forêt de Hêtres d'Europe située dans l'ouest des Pyrénées de part et d'autre de la frontière franco-espagnole, est une zone particulièrement sujette aux activités de type agricole et touristique.

Le but de ce travail a été d'étudier à l'échelle de l'écosystème, les variations de compositions isotopiques en plomb (Pb) et en mercure (Hg) dans des lichens épiphytes (Hypogymnia physodes, Parmelia caperata et Parmelia sulcata), intégrateurs de la pollution atmosphérique, sur plusieurs transects nord-sud à différentes altitudes et de discriminer les sources à l'origine de ces signatures. Les compositions isotopiques du Pb dans les lichens ne présentent pas de variations significatives (206Pb/207Pb de 1.142 à 1.158) que ce soit en fonction de la localisation (versant français ou espagnol) ou de l'altitude suggérant une homogénéité de la contamination atmosphérique sur la forêt d'Iraty. Les valeurs obtenues, similaires aux valeurs reportées dans la littérature pour des sites de fond, sont représentatives du bruit de fond atmosphérique Européen. Au contraire, les isotopes du Hg présentent de fortes variations de leur signatures. Le fractionnement dépendant de la masse (FDM noté  $\delta^{202}\text{Hg}$ ) varie de -4.69 à -1.71‰ et le fractionnement indépendant de la masse (FIM noté  $\Delta^{199}\text{Hg}$ ) de -0.43 à +0.08‰. De plus, une relation entre le FDM et les concentrations (de 0.12 à 1.4 mg/kg) apparaît clairement suggérant une source de contamination géographiquement contrainte. Nous proposons que le fort fractionnement isotopique du Hg observé dans les lichens pourrait être induit par un processus de combustion comme les feux pastoraux fréquents sur cette zone durant les périodes hivernales. Ces résultats suggèrent donc que les isotopes du Hg pourrait permettre de tracer l'origine des feux de forêt à l'échelle d'un écosystème.

#### 4.1.11 (o) $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ signatures in mosses and lichens from a Pyrenean forest : influence of long-range transboundary air pollution

Sheila Izquieta<sup>1</sup>, David Elustondo<sup>1</sup>, Cristina Sola<sup>1,2</sup>, Carolina Santamaria<sup>1</sup>, Esther Lasheras<sup>1</sup>, Jesús Miguel Santamaria<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Navarra, Departamento de Biología Vegetal,  
 Pamplona, Espagne  
<sup>2</sup>IPREM-LCABIE, Pau

Increasing anthropogenic nitrogen emissions since the industrial and agricultural revolutions have led to a large atmospheric deposition of this element. Several experimental studies have reported that nitrogen enrichment reduces plant diversity, leading to the conclusion that anthropogenic N deposition is a threat to global biodiversity.

In order to assess the effect of N deposition on ecosystems, mosses and lichens have been widely used as bioindicators in environmental studies carried out in the last few decades. This technique is based on the fact that these species obtain most trace elements and nutrients directly from wet and dry deposition, with little uptake from the substrate. Besides the analytical determination of total N and C contents in plant tissues, the use of their stable isotopes has become a suitable tool to obtain additional information. For example, the analysis of  $\delta^{13}C$  is used to discriminate among plants using different photosynthetic pathways (C3 and C4 plants), to infer water-use efficiency, to determine water and altitude gradients in ecosystems and to study the source of carbon used by plants (including CO<sub>2</sub> enrichment and long-term studies). Concerning N, some key applications using  $\delta^{15}N$  in plants include assessing the contribution of different N sources to plant N uptake (source apportionment), the role of mycorrhizal infection, the uptake of dissolved N and the interpretation of  $\delta^{15}N$  profiles in soils.

In this study, the aforementioned methodology has been applied to samples collected in the Iraty forest (western Pyrenees), an area of high ecological value covering a wide surface between France and Spain. The study has been performed in the frame of the project « Atmospheric Environmental Observations Network in the Pyrenees » (PYNATEO).

#### 4.1.12 (o) Mosses as an integrating tool for monitoring PAH atmospheric deposition : comparison with total deposition. A year-long case-study in a Nature Reserve of Navarra (Spain)

Louise Foan<sup>1</sup>, Maria Domerq<sup>1</sup>, Raul Bermejo<sup>2</sup>, Jesus Santamaria<sup>2</sup>,  
 Valérie Simon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Chimie Agro-Industrielle, Toulouse

<sup>2</sup>Laboratorio Integrado de Calidad Ambiental, Universidad de Navarra, Pamplona, Espagne

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are molecules known for their carcinogenic and mutagenic effects and are listed as priority organic pollutants by the United States Environmental Protection Agency, the World Health Organization and the European Community. They are produced from fossil or non-fossil fuels by pyrolysis or pyrosynthesis. Their occurrence in the environment is mainly of anthropological origin.

The biosphere intercepts these contaminants during atmospheric deposition. In this way, biomonitors like conifer needles, deciduous leaves, lichens and mosses/bryophytes can be a useful strategy to monitor the exposure of wildlife and human populations to these pollutants. The results described in this study are the first to be based on year-long measurements of PAH concentrations in bioindicators and in total deposition. PAH atmospheric deposition was evaluated at a remote site in Northern Spain using moss biomonitoring with *Hylocomium splendens* (Hedw.) Schimp., and by measuring the total deposition fluxes of PAHs. The year-long study allowed seasonal variations of PAH content in mosses to be observed, and these followed a similar trend to those of PAH fluxes in total deposition. Generally, atmospheric deposition of PAHs is greater in winter than in summer, due to more PAH emissions from domestic

heating, less photoreactivity of the compounds, and intense leaching of the atmosphere by wet deposition. However, fractionation of these molecules between the environmental compartments occurs : PAH fluxes in total deposition and PAH concentrations in mosses are correlated with their solubility ( $r = 0.852$ ,  $p < 0.01$ ) and lipophilic properties (KOW,  $r = 0.768$ ,  $p < 0.01$ ), respectively. Therefore, PAH flux monitoring can only be used to assess the relative contents of PAHs in ecosystems if the bioconcentration factors are known.

#### 4.1.13 (p) Historical trends of polycyclic aromatic hydrocarbon deposition in a remote area of Spain using herbarium moss material

Louise Foan<sup>1</sup>, David Elustondo<sup>2</sup>, Esther Lasheras<sup>2</sup>, Laura Gonzalez<sup>2</sup>,  
 Alicia Ederra<sup>3</sup>, Jesus Santamaria<sup>2</sup>, Valérie Simon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Chimie Agro-Industrielle, Toulouse

<sup>2</sup>Universidad de Navarra, Departamento de Química y Edafología,  
 Pamplona, Espagne

<sup>3</sup>Universidad de Navarra, Departamento de Biología Vegetal,  
 Pamplona, Espagne

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are persistent organic pollutants emitted through incomplete combustion of organic material by industries, waste incineration, domestic heating and traffic. Due to their slow rates of degradation, their toxicity and potential for both long-range transport and bioaccumulation in living organisms, PAHs are monitored in the entire environment. Bryophytes have been employed over the past decades as biomonitors for the assessment of airborne pollutant deposition.

Herbarium mosses from 1879-1881, 1973-1975 and 2006-2007 were used to investigate the historical changes of atmospheric deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) at a remote site in Northern Spain. Natural abundance of nitrogen and carbon isotopes was also measured in order to assess the evolution of emissions from anthropogenic sources. Nitrogen and PAH concentrations as well as  $\delta^{13}C$  and  $\delta^{15}N$  ratios were significantly higher in 19th century samples compared to present century samples. Moreover, PAH distribution varied over the centuries, with the trend towards enrichment in light PAHs. The carbon, nitrogen and PAH concentrations measured in the mosses tally with the historical evolution of anthropogenic emissions in the area, mainly influenced by changes in economic activities, domestic heating and road traffic density. Mosses provided by herbaria seem to offer the possibility of studying long-term temporal evolution of atmospheric PAH deposition.

#### 4.1.14 (p) Concentrations en éléments traces dans des pelotes de réjection et des excréments d'un oiseau de rivière spécialiste : une approche indirecte pour l'évaluation environnementale ?

Gilles Bareille<sup>1</sup>, Frank D'amico<sup>2</sup>, Noelle Bru<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LCABIE-IPREM, Pau

<sup>2</sup>LMAP, Pau

Le Cincle plongeur (*Cinclus cinclus*), oiseau de rivière qui se nourrit d'invertébrés aquatiques, d'alevins de poissons et de gastéropodes, constitue un prédateur de dernier rang susceptible de refléter les modifications subies par l'écosystème aquatique auquel il est inféodé. Dans les Pyrénées, le Cincle plongeur est présent en vallée d'Ossau, zone de

montagne relativement fragile et sensible aux perturbations de l'environnement. Ce travail a examiné les niveaux de concentrations en éléments traces métalliques (Zn, Pb, Cd, Cu, Sr, Ba, Ca) dans des pelotes de réjection et des excréments de cet oiseau. Dans ce secteur a priori peu exposé aux apports de contaminants métalliques, les pelotes de réjection contiennent des quantités faibles en la majorité des éléments analysés, alors que les excréments sont en général caractérisés par de très concentrations 5 à 10 fois plus élevées pour les éléments Zn, Cu et Cd. D'autre part, une très forte variabilité est observée que ce soit pour les pelotes ou les excréments souvent indépendamment de la date de collection. Les concentrations de ces mêmes éléments sont par contre relativement faibles dans les eaux de la rivière, en accord avec des apports chroniques limités. En effet, dans cette zone les métaux proviennent essentiellement de l'érosion du substratum géologique, des retombées atmosphériques (sèche ou humide) et dans une moindre mesure des activités humaines locales (hydro-électricité, pastoralisme, tourisme estival et hivernal, agriculture). La variabilité observée pourrait trouver alors son origine dans une grande diversité de modèles de bio-accumulation et/ou bio-régulation des multiples proies consommées par le Cincle plongeur.

#### 4.1.15 (p) Evaluation de la variabilité spatiale des dépôts atmosphériques et de leur transport par approche multi-élémentaire à méso-échelle dans les lichens des Pyrénées-Atlantiques (Sud-ouest de la France)

Julien Barre<sup>1</sup>, David Amouroux<sup>1</sup>, Gaëlle Deletraz<sup>2</sup>, Cristina Sola-Larrañaga<sup>3</sup>, Sylvain Béraïl<sup>1</sup>, Hervé Pinaly<sup>1</sup>, Jesus Santamaria<sup>3</sup>, Olivier Donard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LCABIE-IPREM, Pau

<sup>2</sup>SET, Pau

<sup>3</sup>Universidad de Navarra, Pamplona

La variabilité géographique des concentrations élémentaires (Pb, Hg, Cu, Cd, C et N) et des compositions isotopiques (Pb, Hg, C et N) a été évaluée dans des lichens épiphytes collectés à l'échelle d'un territoire (Pyrénées-Atlantiques) préalablement découpé en plusieurs grandes zones définies en fonction de l'occupation des sols (zones urbaines, industrielles, agricoles et forestières) sur lesquelles plusieurs espèces de lichens ont été collectées et mélangées (*Evernia Prunastri*, *Parmelia Sulcata*, *Parmelia Caperata*, *Hypogymnia Physodes*). Les concentrations élémentaires montrent que les zones anthropisées (urbaines et industrielles) présentent de plus fortes concentrations en Pb et Cu (respectivement  $11.7 \pm 9.1$  et  $9.5 \pm 3.7$  mg/kg) que les zones rurales (agricoles et forestières) (respectivement  $6.8 \pm 2.7$  et  $6.0 \pm 4.7$  mg/kg) principalement du au trafic routier et aux activités industrielles. Les isotopes du Pb permettent de différencier les zones anthropisées, ayant une signature issue de la rémanence des essences plombées, des zones rurales proche du bruit de fond atmosphérique Européen. La composition isotopique en Hg montre que le fractionnement indépendant de la masse (FIM) est homogène sur le territoire ( $\Delta^{199}\text{Hg} = -0.32 \pm 0.09\%$ ). Au contraire, le fractionnement dépendant de la masse (FDM) et notamment sur les zones industrielles les plus à l'ouest (Pays Basque) présente des valeurs ( $\delta^{202}\text{Hg} = -1.10 \pm 0.33\%$  contre  $-2.10 \pm 0.44\%$  pour les zones rurales) directement imputable à la proximité d'une contamination de type industrielle (aciérie). De plus, l'utilisation de système d'information géographique (SIG) a permis de mettre en relation des paramètres géographiques tels que l'occupation des sols, l'altitude, les densités industrielles et urbaines et le trafic routier avec les différents contaminants étudiés. Ce travail démontre l'importance des méthodes d'échantillonnage intégrées dans la compréhension de la distribution d'une contamination à l'échelle d'un territoire.

#### 4.1.16 (p) Spatial repartition and disequilibrium of natural radionuclides from the U-Th decay chains in a small catchment in the French Pyrenees

Alicia Cuvier<sup>1,2,3</sup>, Laurent Pourcelot<sup>2</sup>, Adrien Claustres<sup>1</sup>, Fabien Panza<sup>3</sup>, Pieter Van Beek<sup>4</sup>, Anaëlle Simonneau<sup>1</sup>, Maxime Enrico<sup>1,6</sup>, Didier Galop<sup>6</sup>, Florence Mazier<sup>5</sup>, Gaël Le Roux<sup>7</sup>, Xavier Cagnat<sup>8</sup>, Mickaël Motelica-Heino<sup>9</sup>

<sup>1</sup>Ecolab, Toulouse

<sup>2</sup>Laboratoire d'étude radioécologique du milieu continental et marin, Saint Paul Lez Durance

<sup>3</sup>Pôle radioprotection, Environnement, Déchets et Crises, Service d'Intervention et d'Assistance en Radioprotection, Fontenay aux Roses Cedex

<sup>4</sup>LEGOS, Toulouse

<sup>5</sup>GEODE, Toulouse

<sup>6</sup>GET, Toulouse

<sup>7</sup>ENSAT, Toulouse

<sup>8</sup>Laboratoire de mesure de la radioactivité dans l'environnement, Orsay

<sup>9</sup>ISTO, Orléans

Mountain wetlands constitute potential traps for natural radionuclides from bedrock alteration depending on their physico-chemical properties. Generally, from the U-Th decay chains, uranium isotopes are the most soluble but mountain soils and mires have particular properties (redox conditions, high organic matter content) that enhance the accumulation of uranium. Uranium concentrations as high as 4000 mg/kg could be found in particular alpine soils (Regenspurget al, 2010).

Spatial distribution of natural radionuclides from the U and Th decay chains was investigated in soils, sediments and mires from the Haut-Videssos, Ariège, in the frame of the Observatoire Hommes et Milieu Haut-Videssos, Pyrenees using gamma ray and mass spectrometry. The aims of this study are to characterize the surface and depth repartition of natural radionuclides of the Bassiès valley through the study of three peat cores and soils samplings and to determine the radionuclides sources. In this view, the study of U-Th decay chains disequilibrium could be used as a tracer of surficial processes.

Additionally, a gamma ray map of the Bassiès valley will be realized in September 2014 with the SIAR unit of IRSN, in order to improve the knowledge in natural radionuclides distribution in this area. For example, a particular mire called Etang Mort shows an enrichment in total uranium with depth, reaching 300 mg/kg at 6m of depth. For other mires, uranium concentrations are low but disequilibrium inside the U-238 decay chain clearly indicates past external inputs of uranium with Ra-226/U-238 ratio around 0.08. Moreover soils sampling from an altitudinal soil transect clearly show depletion in uranium isotopes indicating a potential leaching to the bottom of the valley. This is in good agreement with results from the main lake in the valley which show that sediment cores of present uranium concentrations around 300 mg/kg at 1.25m of depth.

#### 4.1.17 (p) Polycyclic aromatic hydrocarbons in mosses from three European areas located in France, Switzerland and Spain : Influence of site-specific and regional characteristics on their occurrence

Louise Foan<sup>1</sup>, Sébastien Leblond<sup>2</sup>, Roland Pesch<sup>1</sup>, Lotti Thöni<sup>4</sup>, Christine Raynaud<sup>1</sup>, Jesus Santamaria<sup>5</sup>, Mathieu Sebilou<sup>6</sup>, Valérie Simon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Chimie Agro-Industrielle, Toulouse

<sup>2</sup>Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris

<sup>3</sup>Lehrstuhl für Landschaftsökologie, Universität Vechta Postfach,  
Vechta, Allemagne

<sup>4</sup>FUB - Research Group for Environmental Monitoring,  
Rapperswil-Jona, Suisse

<sup>5</sup>Universidad de Navarra, Departamento de Química y Edafología,  
Pamplona, Espagne

<sup>6</sup>Université Pierre et Marie Curie, Paris

Regulation of persistent organic pollutant (POP) emissions and reliable monitoring of POP concentrations in ambient air is of paramount importance because of their slow degradation rates, toxicity and potential for long-range transport and bioaccumulation in living organisms. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in particular are ubiquitous and appear to be carcinogenic, mutagenic and immunotoxic. Their concentrations in mosses have shown similar spatial patterns and temporal trends to ambient air concentrations.

This study was carried out to investigate whether mosses can be used as biomonitors of atmospheric deposition of PAHs at a European scale. Mosses *Hypnum cupressiforme* Hedw. were collected during October 2010 at 61 sites of 3 European regions : Île-de-France (France), Navarra (Spain) and the Swiss Plateau (Switzerland). Stable isotopes at natural abundance levels in mosses also provide a powerful approach for understanding environmental interactions. Isotopic composition of elements, such as carbon and nitrogen, changes in predictable ways during their course through the biosphere, which makes them ideal tracers of the pathways and origins of these elements. Total PAH concentrations of 100-700 ng g<sup>-1</sup>, δ<sup>13</sup>C of 32 to -29‰ and δ<sup>15</sup>N of -11 to -3‰ were measured ; with no clear common trend between PAH levels and isotopic ratios. Influence of site-specific and regional characteristics was studied with principal component analysis, partial least square regressions and Pearson correlation tests. Very significant correlations ( $r > 0.91$ ,  $p < 0.0001$ ) between high molecular weight PAHs (4-6 aromatic rings) were partially explained by local urban land use (< 10 km). Environmental factors such as altitude and pluviometry also appeared to have a significant negative influence on their content in mosses. Finally, specific correlations with heavy metals were attributed to industrial emissions in Switzerland and road traffic emissions in Navarra.

#### 4.1.18 (p) Variability of artificial radionuclides in a small catchment in the French Pyrenees

Gael Le Roux<sup>1</sup>, Adrien Claustres<sup>1</sup>, Alicia Cuvier<sup>1,2</sup>, Anaëlle Simonneau<sup>3</sup>, Maxime Enrico<sup>1,4</sup>, Didier Galop<sup>3</sup>, Florence Mazier<sup>3</sup>, David Caval<sup>2</sup>, Marc Souhaut<sup>5</sup>, Xavier Cagnat<sup>6</sup>, Anne Probst<sup>1</sup>, François De Vleeschouwer<sup>1</sup>, Laurent Pourcelot<sup>2</sup>, Pieter Van Beek<sup>6</sup>

<sup>1</sup>EcoLab, Toulouse

<sup>2</sup>LERCIM, Saint Paul Lez Durance Cedex

<sup>3</sup>GEODE, Toulouse

<sup>4</sup>GET, Toulouse

<sup>5</sup>LEGOS, Toulouse

<sup>6</sup>Laboratoire de mesure de la radioactivité dans l'environnement,  
Orsay

Depth distribution of artificial radionuclides (137Cs, 241Am) was investigated in peat and lake cores from the Haut-Videssos, Ariège, in the frame of the Observatoire Hommes et Milieu Haut-Videssos, Pyrenees. Chronologies of the accumulation of those radionuclides were reconstructed using age-depth models based either on 210Pb CRS model or on 14Cbomb-pulse. In addition, soils from the same area were investigated and artificial radionuclide inventories were calculated along an altitudinal soil transect. The three lake cores give similar chronologies of 137Cs

accumulation with a beginning in the early fifties, an increase in the seventies and finally an additional increase after the Chernobyl event. However, the largest lake called Etang Majeur also seems to be influenced by its watershed because there is a slight delay and a smoothing between this and the 2 smallest and highest lakes with smaller watersheds. Radionuclide inventories in the lake cores are in good agreement with IRSN atmospheric deposition model which gives an approximate 3/2 ratio respectively for the 137Cs from the Nuclear Weapon Tests and for the 137Cs from Chernobyl. The chronologies of 137Cs are not preserved in the peat columns of the same area. Soil 137Cs inventories vary from 20 to 100 and 1000 to 4500 Bq m<sup>-2</sup> for 241Am and 137Cs respectively. IRSN model gives an approximate 137Cs activity of 5000 Bq m<sup>-2</sup> in soils from this area in 2010. 137Cs inventory measured in the largest lake is higher (5500 Bq m<sup>-2</sup>) than inventories measured in the soils, mires and the 2 other lakes, which marks clearly an additional input than the atmospheric one and a non-negligible transfer of 137Cs from the mountain soils and mires to the watersheds.

## 4.2 Des rifts à la chaîne de montagne : l'exemple des Pyrénées

### (From rifting to mountain building : the example of the Pyrenees)

#### Responsables :

- Michel de Saint Blanquat (GET, Toulouse)  
michel.desaintblanquat@get.obs-mip.fr
- Yves Lagabrielle (Géosciences Rennes)  
yves.lagabrielle@univ-rennes1.fr
- Gianreto Manatschal (IPG Strasbourg)  
manat@unistra.fr
- Mary Ford (CRPG, Nancy)  
mford@crpg.cnrs-nancy.fr
- Frederic Mouthereau (ISTeP, Paris)  
frederic.mouthereau@upmc.fr
- Frederic Christophoul (GET, Toulouse)  
frederic.christophoul@get.obs-mip.fr

#### Résumé :

La géologie pyrénéenne a généré et génère toujours de nombreuses controverses en raison d'un cadre cinématique très discuté, et de signatures géologiques et géophysiques ambiguës. Les modèles récents qui montrent l'exhumation anté-orogénique du manteau ont considérablement relancé l'intérêt de la communauté géologique pour cette chaîne qui est récemment devenu la cible de nombreux projets nationaux et internationaux.

Cette session a pour objectif d'illustrer et de discuter les processus associés à la formation des rifts, à leur inversion, et à l'évolution du domaine orogénique associé, à partir d'observations et de modèles réalisés actuellement dans les Pyrénées.

A l'heure actuelle, les principales questions de la géologie pyrénéenne concernent :

- le rôle de l'héritage structural et rhéologique varisque dans le rift crétacé et son inversion,
- la cinématique de la plaque ibérique,
- la géométrie 3d du rift crétacé, et les relations spatiales et temporelles entre décrochement et extension,
- les modalités de l'exhumation du manteau,
- les interaction entre fluides, métamorphisme et déformation, avant et après l'inversion,
- l'âge du début de la convergence Ibérie / Eurasie, le taux de raccourcissement qui lui est associé, et sa distribution dans la chaîne,
- le rôle de la transpression et des déplacements décrochant pendant l'orogénèse,
- l'évolution du bassin Aquitain en lien avec la croissance de la chaîne (évolution de son relief).

La session vise à réunir les chercheurs travaillant actuellement sur le chantier Pyrénées pour illustrer les travaux en cours et discuter des nouvelles interprétations et idées sur l'évolution cinématique, structurale, magmatique, thermique et sédimentaire du domaine Pyrénéen au sens large, entre la fin de l'évolution varisque et la fin de l'évolution orogénique alpine.

Nous encourageons spécialement des approches interdisciplinaires reliant des approches géologiques, géophysique, et/ou modélisation pour imager, décrire, quantifier et interpréter les processus géodynamiques associés à l'évolution des Pyrénées.

#### 4.2.1 *Keynote communication* : L'exploration des marges continentales : revisite des analogues fossiles dans les Pyrénées / Exploration of continental margins : the fossil analogs of the Pyrenees revisited

Patrick Untermehr<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TOTAL, Paris-La Défense

Des découvertes pétrolières majeures et mutantes ont été réalisées ces dernières années sur le Deep Offshore des marges continentales. Ce sont en particulier :

- les découvertes d'huile du Brésil présel dans des séries carbonatées « synrift » dont les caractéristiques ont été totalement inattendues révélant un environnement de dépôt particulier possiblement de manteau exhumé associé à l'ouverture océanique
- les découvertes de gaz du bassin de la Rovuma dans un contexte de piégeage nouveau de séquence postrift associé au front compressif d'un delta tertiaire
- la découverte d'Hydrocarbure du Ghana dans un contexte de piégeage stratigraphique (biseau) de turbidites post rift associé à un contexte de marge transformante

Ces découvertes ont mobilisé toute l'industrie et ont déclenché de nombreuses acquisitions sismiques sur toutes les marges continentales (non volcaniques, volcaniques et transformantes). Ces nouvelles données sismiques de réflexion, longue écoute et réfraction montrent des images qui « re-questionnent » divers concepts utilisés classiquement pour l'interprétation des marges (limite océan-continent, « Break up unconformity », blocs tiltés, pré rift/syn rift/postrift, thermicité). Par contre, ces données sismiques sont rarement contrôlées par des données de puits qui calibrent les séries sédimentaires.

Il devient alors primordial d'étudier les analogues fossiles pour avoir accès « aux cailloux » et aux géométries de contact entre les roches. Les Pyrénées constituent ainsi un laboratoire naturel de premier ordre car c'est un domaine relativement peu déformé, qui a été depuis longtemps étudié en surface et en sub-surface, qui présentent des roches de manteau exhumé (Lherzolites) lors du rifting Crétacé et qui se situent dans la prolongation du rift qui a poursuivi son océanisation dans le Golfe de Gascogne. Par exemple, les zonations depuis la marge proximale à la marge distale peuvent être tentativement cartographiées, les roches peuvent fournir des contraintes sur l'état thermique à l'époque du rifting. C'est donc un analogue fossile de marge, très bien cartographié mais qui peut être revisité à la lueur des questions pétrolières engendrées par les découvertes pétrolières récentes.

Cette présentation aura pour objectif de présenter le questionnement engendré par les résultats pétroliers sur les marges et les résultats que peuvent apporter l'étude des marges fossiles des Pyrénées.

#### 4.2.2 *Keynote communication* : Extreme thinning of the continental crust and mantle exhumation at passive margins. Constraints from the Pyrenean analog

Camille Clerc<sup>1,2,3</sup>, Yves Lagabrielle<sup>4</sup>, Abdeltif Lahfid<sup>5</sup>, Alain Vauchez<sup>5</sup>, Pierre Labaume<sup>2</sup>, Romain Bousquet<sup>6</sup>

<sup>1</sup>LGE, Paris

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier

<sup>3</sup>ISTO, Orléans

<sup>4</sup>Géosciences Rennes

<sup>5</sup>BRGM, Orléans

<sup>6</sup>Institut für Geowissenschaften, Kiel, Allemagne

We present an overview of the Mid-Cretaceous hyper-extended rift system exposed in the northern part of the Pyrenean mountain range. Its inversion during the Pyrenean orogeny allows for precious observations of the deep-seated processes occurring at the foot of distal margins. Some peculiar aspects characterizing the pre-Alpine hyper-extended domain are examined throughout the 400 km long suture that is fossilized in the North Pyrenean Zone (NPZ). The high temperature/low pressure (HT/LP) thermal imprint of the extensional event is studied thanks to a dataset of more than hundred peak temperature measurements by Raman spectroscopy of the carbonaceous material (RSCM). The pre- and syn-rift metasediments are characterized by an intense, syn-metamorphic ductile deformation. Focusing on several key-localities of the NPZ, we examine the emplacement conditions of the peridotites in response to this extreme crustal thinning. Geological evidences such as the occurrence of peridotite bodies directly underlying metamorphic pre-rift sediments indicate an early attenuation of the rifted continental crust. Moreover, syn-rift, Albian-Cenomanian flysch sequences were deposited synchronously with the syn-metamorphic ductile deformation of the pre-rift sequences. All along the Internal Metamorphic Zone (IMZ), the base of the flysch deposits also recorded the HT tectonic event. Such a synchronicity between geological events, which are generally separated in time, is not common in mountain belts. We examine how tectonics, metamorphism and sedimentation may be active in a single basin during extension. We propose an original mechanism for the evolution of the basins involving continuous basal extraction of the pre-rift metamorphic sediments. This early HT deformation event relates to the « phase anté-Cénomaniennne » described by Pyrenean geologists since 1930.

#### 4.2.3 (o) Le Métamorphisme Nord Pyrénéen dans la Forêt de Boucheville : étude isotopique en O et C des veines à calcite + quartz

Philippe Boulvais<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

Le Métamorphisme Nord Pyrénéen (MNP), d'âge Cenomanien-Turonien, affecte la région localisée au nord du tracé cartographique de la Faille Nord Pyrénéenne (FNP). De nombreux bassins sédimentaires albiens jalonnent la FNP, et ont ainsi subi l'impact du MNP. Sur l'exemple de la Forêt de Boucheville, l'intensité du MNP augmente du nord vers le sud, sur quelques kilomètres. Cela se traduit par l'apparition d'un plagioclase calcique, de biotite, de graphite et de quantités mineures de tourmaline, de sulfures et de titanite, au détriment d'argiles et de matière organique. Calcite et quartz complètent l'assemblage minéralogique.

Dans la zone métamorphisée du bassin de la Forêt de Boucheville, de nombreuses veines sont visibles. Plissées et/ou schistosées, elles sont constituées de calcite, quartz, et minoritairement de biotite et de sulfures. Elles attestent de circulations de fluides synchrones du métamorphisme et de la déformation régionale syn-métamorphe.

La géochimie des isotopes stables permet de discuter l'origine des fluides ayant causé la formation de ces veines, et par suite l'éventuel rôle de ces fluides en tant que vecteur de chaleur dans la région. Sur les roches de la Forêt de Boucheville, nous avons donc mesuré les compositions isotopiques en O et C de nombreuses veines et de leur roche hôte. Les variations isotopiques des roches hôtes se retrouvent dans celles des veines ; cette observation correspond au cadre théorique d'un système d'interaction fluide-roche en système fermé. En parallèle, les roches hôtes en contact immédiat avec les veines sont appauvries en calcite, signe d'une migration très locale, centimétrique, du calcium nécessaire à la croissance de la calcite des veines. Nous concluons donc que les veines représentent la trace de circulations de fluides libérés au cours

des recristallisations métamorphiques. Ces circulations de fluides sont une conséquence du Métamorphisme Nord Pyrénéen, non une cause.

#### 4.2.4 (o) The conundrum of remagnetized Albian turbidites in the Basin of Mauleon, North Pyrenees

Charles Aubourg<sup>1</sup>, Philippe Robion<sup>2</sup>, Guilhem Hoareau<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau

<sup>2</sup>GEC, Cergy Pontoise

A paleomagnetic work on Albian turbidites in the Mauleon basin revealed the existence of two paleomagnetic components of normal and reverse polarity (Oliva-Urcia et al; 2008). We provide complementary rock magnetic data and propose a scenario of remagnetization. The normal polarity paleomagnetic component is carried by magnetite while the reverse polarity is carried by pyrrhotite. According to Aubourg et al. (2012), we propose that magnetite formed during <250°C burial, while pyrrhotite formed in the excess of temperature up to 350°C. This scenario agrees with burial temperature documented by Clerc (2012). The normal polarity might be recorded between 100 (Albian) and 84 Ma, within the long chrone of normal polarity C34N. At this time, the Albian clastics reached the maximum of depth in basinal conditions. The reverse polarity took place after the normal polarity, and likely after the onset of basin inversion, during the chrone C33R (80-84 My). The rise of temperature up to 350°C is however difficult to explain because it is restricted geographically.

#### 4.2.5 (o) Nouvelles données pétrologiques, sédimentologiques et structurales sur le bassin de Boucheville, le massif de l'Agly et sur le métamorphisme Albien

Roman Chelalou<sup>1</sup>, Thierry Nalpas<sup>1</sup>, Romain Bousquet<sup>2,3</sup>, Mathieu Barthas<sup>1</sup>, Maxime Prevost<sup>4</sup>, Yves Lagabrielle<sup>1</sup>, Jean-Claude Ringenbach<sup>5</sup>, Jean-François Ballard<sup>5</sup>, Abdeltif Lahfid<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

<sup>2</sup>Institut für Geowissenschaften, Kiel, Allemagne

<sup>3</sup>Christian-Albrechts-Universität, Kiel - Allemagne

<sup>4</sup>ENSG, Nancy

<sup>5</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>6</sup>BRGM, Orléans

Les bassins mésozoïques de la zone Nord-Pyrénéenne ont été mis en place lors de l'extension entre les plaques Européenne et Ibérique à l'Albien. La partie sud de la ZNP a subi un métamorphisme HT/BP lié à cette extension. Ce métamorphisme Albien est observé dans les bassins et dans les massifs cristallins nord-pyrénéens où il est associé à des filons d'albitites et à du manteau exhumé.

Deux campagnes de terrains ont été réalisées afin de cartographier et d'échantillonner une zone comprenant à la fois des bassins mésozoïques (Boucheville et Saint Paul de Fenouillet) et une zone de socle (massif de l'Agly).

Une étude sédimentologique et structurale a permis de produire un log synthétique du bassin de Boucheville et des coupes restaurées de la zone. Une coupe Nord-sud montre notamment que le bassin de Boucheville est un grand anticlinal bordé de deux synclinaux isoclinaux fortement asymétriques.

Des mesures RAMAN sur matière organique ont été réalisées dans le bassin de Boucheville en cohérence avec le log afin d'obtenir une carte des températures du métamorphisme Albien. Elles révèlent une forte homogénéité des températures situées entre 500°C et 600°C.

Enfin une étude pétrologique du massif de l'Agly a révélé la présence de deux phases de métamorphisme HT/BP, séparées par une phase d'exhumation. Les conditions mesurées sont de 2,7 - 3,5 kbar et 700 - 800°C pour le premier événement et de 5,8 - 7 kbar et 750 - 825°C pour le second.

Ces données combinées permettent de proposer un modèle d'évolution tectono-sédimentaire et métamorphique de la zone pendant l'extension Albienne et posent des questions quant aux interactions qui peuvent exister entre la mise en place d'un bassin et un métamorphisme de haut grade en phase extensive.

#### 4.2.6 (o) Métasomatisme et déformation liés à l'exhumation du manteau en contexte de marge passive distale : étude du massif du Sarraillé (Zone Nord-Pyrénéenne, chaînons Béarnais)

Benjamin Corre<sup>1</sup>, Yves Lagabrielle<sup>2</sup>, Michel Ballèvre<sup>2</sup>, Philippe Boulvais<sup>2</sup>, Serge Fourcade<sup>2</sup>, Pierre Labaume<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>Géosciences Rennes

<sup>3</sup>Géosciences Montpellier

De nombreux pieds de marges continentales passives sont caractérisés par la présence de manteau exhumé (Galice, Angola, Scandinavie, Mer Rouge, Mer Tyrrhénienne, Australie, ...). Dans le cas des marges pyrénéennes, le manteau est exhumé en contexte extensif suite à l'amincissement crustal extrême et mis en contact avec les sédiments sus-jacents de la couverture pré-rift. Les chaînons Béarnais (Pyrénées Occidentales) sont les restes de cette couverture sédimentaire Mésozoïque associée à des pointements de socle Paléozoïque et de manteau. Le massif du Sarraillé (anticlinal de Sarrance) où sont rassemblées toutes ces lithologies est un endroit idéal pour l'étude de la genèse des marges à manteau exhumé. Ce massif a fait l'objet d'une étude détaillée : cartographie, structure, évolution métamorphique, géochimie isotopique. La cartographie a révélé que la structure est une tête anticlinale couchée affectant l'ensemble de la couverture Mésozoïque pré-rift et dont le cœur est constitué de lentilles de socle et de manteau. Nous nous sommes particulièrement intéressés au contact entre la couverture Mésozoïque, dont la base est métamorphique et le socle. Un intense métasomatisme précoce, syn-extension est révélé par la présence de lentilles pluri-métriques de talc et chloritites, ainsi que par le développement de filonets d'albitites. Les analyses d'isotopes stables ( $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{13}C$ ) réalisées dans la couverture sédimentaire montrent l'importance des circulations de fluides métamorphiques durant l'exhumation du manteau et font du massif du Sarraillé une référence pour les systèmes d'interactions fluide/roche au pied des marges continentales distales. Nos analyses couplées aux observations de terrain permettent de compléter les modèles d'amincissement crustal extrême et de remontée du manteau. Nous montrons donc que la déformation ductile de la croûte continentale le long d'un grand détachement, s'accompagne de boudinage et se résout par l'individualisation de minces écaillés de socle réparties sur le manteau exhumé.

#### 4.2.7 (o) Nouvelles datations des gisements de talc/chlorite de Trimouns et des autres occurrences dans les Pyrénées

Alexandre Boutin<sup>1</sup>, Michel de Saint Blanquat<sup>1</sup>, Marc Poujol<sup>3</sup>, Philippe Boulvais<sup>3</sup>, Philippe De Parseval<sup>3</sup>, Jean-François Robert<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Imerys talc, Toulouse

<sup>3</sup>Géosciences Rennes

Un faisceau de données obtenues récemment sur la zone nord-pyrénéenne montrent l'existence au Crétacé, probablement lors de l'ouverture du golfe de Gascogne, d'un amincissement crustal extrême associé à l'exhumation tectonique du manteau sous-continentale (Lagabrielle et Bodinier, 2008 ; Jammes et al., 2009 ; Lagabrielle et al., 2010 ; Clerc et al., 2012, 2013). Ces études apportent des contraintes fortes sur l'évolution pré-orogénique des Pyrénées. En plus de ces nouvelles données qui changent complètement notre regard sur la signification des roches du manteau dans la zone nord pyrénéenne, de nombreuses études dans cette région montrent le rôle important joué par les fluides dans l'évolution mécanique et chimique des roches de la croûte et du manteau lors de ces phases d'exhumation. On peut noter particulièrement les albitites et les gisements de talc-chlorite que l'on retrouve dans toute cette zone (Schärer et al., 1999 ; Boulvais et al., 2007 ; Poujol et al., 2010 ; Fallourd et al., 2014). Ces résultats nous permettent de montrer l'existence d'un événement hydrothermal d'ampleur régionale, d'âge albien, qui serait donc contemporain de l'exhumation du manteau et de l'amincissement de la croûte.

Des nouvelles données géochronologiques obtenues par la datation U-Pb in situ (LA-ICP-MS) des titanites hydrothermales, minéral accessoire commun dans ces gisements métasomatiques et associé à la genèse du talc et des chlorites, confirment l'âge albien du talc, mais montrent également la trace d'événements métasomatiques antérieurs (permotriassiques, jurassiques et crétacés inférieurs) à Trimouns mais aussi dans les autres minéralisations talco-chloriteuses de la partie orientale de la chaîne. Cette mise en évidence d'épisodes de circulations de fluides répétés durant tout le mésozoïque nous permet de préciser l'histoire alpine du socle varisque pyrénéen, et donc de mieux y séparer les effets de ces différents orogènes.

#### 4.2.8 (o) Evidences for a « hot » regional-scale Cretaceous Na-Ca metasomatic event in the Pyrenees

Marc Poujol<sup>1</sup>, Philippe Boulvais<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

In the Pyrenees, a Na-metasomatic event dated between 117 and 98 Ma has been recognized and was related to the hydrothermal system associated with the transtensive displacement of the Iberian plate relative to Europe.

A set of geochemical and geochronological data has been acquired on five new occurrences of albitized rocks, sampled both to the north and to the south of the North Pyrenean fault (NPF). These albitized rocks are associated with ductile shear zones, faults, or undeformed zones and were developed at the expense of various protoliths (granite, migmatized metasediments or migmatites). None of these samples are pure albite, but their chemical and mineralogical evolutions demonstrate they have undergone dequartzification and albitization and even a slight carbonatation (CaO > 4%). The oxygen isotope compositions show that each of them developed under a peculiar regime of fluid-rock interaction, during which either the temperature or the fluid-rock ratio may have been different. The temperature of the Na-Ca metasomatism, based on the presence of newly formed andesine and sillimanite is estimated to be above 550°C. U-Pb dating on titanite show that albitization took place between 110 and 92 Ma, ie a period comparable with the known ages for the LP-HT North Pyrenean metamorphism (110-85 Ma).

Na and Na-Ca metasomatisms are now recognized in the Northern Pyrenees, both sharing a common spatial and temporal distribution suggesting that they are two complementary records of the same long-lasting hydrothermal event. In further detail, the Na-metasomatism is restricted to the north of the NPF and is slightly older than the Na-Ca metasomatism located both to the north and to the south of the NPF. Both the time

constraints and temperature estimates suggest that the Na-Ca metasomatism is related to the low-P high-T North Pyrenean metamorphism, whereas the Na-metasomatism might be related to the talc-chlorite mineralization and could result of surface-derived fluids.

#### 4.2.9 (o) Conditions of formation of serpentinites in Pyrenees and new constraints on the model of exhumation of mantle peridotites

Nicolas Ferreira<sup>1</sup>, Adélie Delacour<sup>2</sup>, Michel de Saint Blanquat<sup>3</sup>, Philippe Boulvais<sup>4</sup>, Mathieu Benoit<sup>3</sup>, Yves Lagabrielle<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LDO, Plouzané

<sup>2</sup>LMV, Saint-Etienne

<sup>3</sup>GET, Toulouse

<sup>4</sup>Géosciences Rennes

Since the mid-80's, several models of emplacement of Pyrenean peridotites have been suggested. The most recent one, published by Lagabrielle et al. in 2010, proposed two types of geological setting for the formation of peridotites : i) sedimentary as debris flows deposits or ii) tectonic via detachment exhumation. In order to bring new constraints on this exhumation model and to integrate it in the Pyrenean history, we studied the conditions of serpentinization of peridotites in several massifs of the Pyrenees. A detailed petrological study reveals that lherzolites were heterogeneously affected by serpentinization all over the Pyrenees. Three different stages of serpentinization have been distinguished : i) massive serpentinization with development of a mesh texture, ii) formation of fibrous or crack-seal chrysotile veins and iii) formation of antigorite veins, in locations with important deformation (Saraillé). In some localities (Urdach, Espechère), a late stage of CO<sub>2</sub>-rich fluid circulation precipitated abundant carbonates, similarly to ophicalcites. Serpentinites show similar multi-elementary spectra, with positive anomalies in Cs, U, Ta and Pb ; however, differences reside in concentrations (from 3 to 250 times primitive mantle). REE patterns are broadly flat with a slight enrichment in HREE. A negative Ce anomaly is observed for some samples attesting of interaction with seawater. First d18O values measured on serpentinites seem to argue that serpentinization in the western Massifs (Urdach, Saraillé) occurred at lower temperatures (a few tens of degrees) than in other massifs. Combination of all these petrological and geochemical data suggest that Pyrenean peridotites were, at some point of their exhumation history, affected by interaction with seawater.

#### 4.2.10 Keynote communication : Architecture et évolution de la limite de plaque entre Ibérie et Europe

Julie Tugend<sup>1,2</sup>, Gianreto Manatschal<sup>1</sup>, Nick Kusznir<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LGE, Paris

<sup>2</sup>IPG Strasbourg

<sup>3</sup>Geology and Geophysics, University of Liverpool, Royaume-Uni

Le Golfe de Gascogne et les Pyrénées correspondent à un ancien système de rift fini-Jurassique à Crétacé incluant des domaines de rift hyper-amincis et océaniques. La compression initiée au Crétacé supérieur aboutit à une déformation hétérogène du système donnant accès à différentes étapes de réactivation. L'association d'observations de géologie de terrain et de géophysique marine a permis d'identifier et cartographier les domaines de rift formés lors de l'ouverture du Golfe de Gascogne et partiellement intégrés à l'orogène Pyrénéen. Cette cartographie terre-mer permet d'étudier l'évolution spatiale et temporelle des systèmes de rift ainsi que la distribution de la déformation extensive associée à la formation de systèmes de rift fortement segmentés.

Les observations et interprétations présentées dans ce travail révèlent l'architecture complexe de la limite de plaque entre Ibérie et Europe. Plusieurs systèmes de rift spatialement distincts sont préservés à des stades d'évolution différents et séparés par des rubans de croûte continentale non amincis (blocs des Landes et d'Ebro). Les mécanismes d'hyper-extension qui caractérisent les systèmes de rift « Golfe de Gascogne-Parentis » et « Basque-Cantabre-Pyrénées » sont diachrones. La restauration du système à la fin de l'hyper-extension, avant l'initiation de la convergence met en avant l'existence de zones de transfert orientées NE-SO dans le système « Basque-Cantabre-Pyrénées » ce qui a des implications pour la cinématique régionale. Un modèle d'évolution est proposé afin d'illustrer le partitionnement de la déformation entre les différents systèmes de rift préservés à la limite entre les plaques ibérique et européenne.

La synthèse de précédentes et nouvelles observations souligne l'architecture 3D complexe et l'évolution polyphasée de la transition entre Ibérie et Europe et remet en question le rôle de la faille Nord Pyrénéenne comme limite de plaque entre Ibérie et Europe.

#### 4.2.11 (o) Diapir rising and squeezing in the north-Pyrenean realm (Chaînon Béarnais) : From mid-Cretaceous hyperextension to Pyrenean inversion

Pierre Labaume<sup>1</sup>, Antonio Teixell<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier

<sup>2</sup>Dpt. de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, Espagne

We present two structural sections across the the Chaînon Béarnais belt (CB) of the northern Pyrenees and discuss a new kinematic evolution emphasizing the role of Triassic salt (Keuper) in folding previous to, and during, the Pyrenean shortening. The CB consists of Jurassic to Lower Cretaceous carbonate anticline ridges separated by synclines with thick Albian-Cenomanian flysch sediments, covered to the north by Upper Cretaceous flysch sequences. Significant folding before the Pyrenean convergence is indicated by erosional truncations, growth strata and reef-to-slope facies changes. Structural restoration points to a Mesozoic diapiric system featuring salt walls and polygonal ridges, enclosing synformal minibasins rapidly subsiding during the Albian-Cenomanian. Salt structures initiated as pillows and anticlines during the Late Jurassic-Early Cretaceous over slowly extending continental crust; extensional rollovers or rafts are not observed. By mid-Cretaceous time, diapirs became detached over strongly thinned crust and exhumed mantle between the north-Iberian and south-European hyperextended margins. A Cenomanian regional unconformity indicates that diapir squeezing may have initiated in the central part of the hyperextended domain as early as the mid-Cretaceous, probably by gravity-induced shortening in the distal continental margins. During the Pyrenean inversion, the detached diapiric system slid backwards onto both the Iberian and European margins, while salt anticlines were further squeezed, giving rise to welds, overturned flaps and salt extrusions. To the north, the North-Pyrenean Frontal Thrust reactivated and squeezed a mid-Cretaceous diapiric ridge initially located along a structural high at the northern boundary of the hyperextended domain (the Grand-Rieu ridge). Pieces of crustal and mantle basement were collected by the Triassic salt horizon during slip on the cover detachment, and uplifted during subsequent diapir rising.

#### 4.2.12 (o) The crustal structure of the west-central Pyrenees revisited : Inferences from a new kinematic scenario

Antonio Teixell<sup>1</sup>, Pierre Labaume<sup>2</sup>, Yves Lagabrielle<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dpt. de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, Espagne

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier

<sup>3</sup>Géosciences Rennes

Crustal-scale models for the Pyrenees based on ECORS reflection profiles have around 20 years now. In recent years, new understandings were gained on the reconstruction to the preorogenic times, namely a scenario of extreme crustal attenuation and mantle exhumation; in turn, this has implications on the interpretation of the present-day structure, as new models for the chain must consider feedbacks between the mid-Cretaceous hyperextension and the Pyrenean inversion. On the W-central Pyrenean traverse, the southern part comprises 3 S-vergent basement thrust units, the Lakora, Gavarnie and Guarga units, flanked by the detached cover of the Jaca piggyback basin and the Ebro basin, where the Mesozoic is thin and Late Cretaceous-Tertiary synorogenic carbonate and detrital sequences record a southward depocenter migration. To the N, the Chaînon Béarnais belt (CB) is a system of Jurassic to Lower Cretaceous carbonate anticline ridges separated by synclines with thick Albian-Cenomanian flysch, covered to the north by Upper Cretaceous flysch sequences. The CB is thrust southwards together with the Lakora thrust unit and northwards onto the Aquitaine basin. CB folding largely results from the rising and squeezing of diapirs initiated during the Jurassic-Early Cretaceous extension. Pieces of crust and mantle lifted in the diapirs attest that the CB derive from a Cretaceous domain of hyperextended continental crust and exhumed mantle. Moho reflections in the ECORS-Arzaq profile constrain the present deep structure. Restoration leads to a Mesozoic cover detachment over the N-Iberian and S-European margins. Inversion began by subduction of the exhumed mantle and folding and pop-up thrusting of the CB cover onto the margins. From the mid-late Eocene onwards, continental collision was accommodated by wedging and thrust stacking in the Iberian crust, involving the piggyback formation of S-vergent basement thrusts in the upper crust, and the northward subduction of the lower crust.

#### 4.2.13 (o) Fracturation, interactions fluide/roche et chimie des fluides dans les séries mésozoïques de la zone Nord Pyrénéenne (exemple des chaînon Béarnais)

Roland Salardon<sup>1</sup>, Cédric Carpentier<sup>1</sup>, Nicolas Bellahsen<sup>2</sup>, Jacques Pironon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GéoRessources, Nancy

<sup>2</sup>ISTeP, Paris

Le bassin aquitain a enregistré une histoire de fracturation complexe lors du rifting mésozoïque ainsi que lors de la compression pyrénéenne. L'objectif de l'étude est de comprendre les relations entre les différents épisodes de fracturations et les événements de migration de fluides afin de proposer un modèle diagénétique en lien direct avec l'histoire d'enfouissement puis d'exhumation du bassin en zone nord pyrénéenne.

Trois sets principaux de fractures ont été définis sur le terrain (notamment sur les flancs raides des plis des chaînon béarnais) et en lame. Le set I après débasculement est composé de joints et veines minéralisées sub-verticaux et orientés ENE-WSW à ESE-WNW (ces fractures sont en position actuelle à faible pendage). Ils sont associés à des évidences de fracturation hydraulique et sont synchrones de fractures sub-parallèles à la stratification. Les fractures du set II sont E-W à pendage moyen vers le sud tandis que celles du set III sont N-S sub-verticales, en position actuelle. Les fractures du set I sont remplies par des ciments dolomitiques (D2) tandis que les fractures du set III sont colmatées par des ciments calcitiques (C1, C2, C3). Le set II est rempli par des ciments dolomitiques et calcitiques (D2, C1, C2, C3). Notre interprétation préliminaire est que le set I est associé à la phase extensive crétacée de la zone nord-pyrénéenne. Le set III semble témoigner de la compression pyrénéenne, tandis que le set II correspond à une phase intermédiaire qui

pourrait être rattachée aux mouvements décrochants albo-cenomanien. Une étude des inclusions fluides (IF) et la caractérisation chimique des fluides parents (MEB, isotopes stable, Raman, microthermométrie) permettront d'affiner l'histoire thermobarométrique du bassin. L'étude préliminaire effectuées sur les inclusions fluides du ciment D2 dans le Portlandien, nous montre des IF composées de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S et CH<sub>4</sub> et présentant des salinités comprises entre 9 et 13 %massique/eq NaCl.

#### 4.2.14 (o) Delimiting the transition between thick-skin and thin-skin and its implications in the Burgalesa Platform salient (Basque Pyrenees)

Eloi Carola<sup>1</sup>, Josep Anton Muñoz<sup>1</sup>, Eduard Roca<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Geomodels Research Institute, University of Barcelona, Espagne

The Basque Pyrenees involves a Jurassic to Upper Cretaceous basin inverted during the building of the Pyrenees. Its southern frontal structure, detached at Upper Triassic evaporites, is a roughly E-W trending major thrust which defines a broad thrust salient concave to the north. To the west another structural unit occupies an intermediate position between the foreland and the main Basque thrust front. This unit, known as Burgalesa Platform, also shows a thrust salient concave to the north, although asymmetric and more pronounced than the previous one. It was developed during the Oligocene and Early Miocene times inverting the extensional basin.

In order to better understand and constrain the evolution of the thrust salient and the role played by the initial configuration of the Mesozoic basins, reinterpretation of seismic lines allowed to propose a new structural model that combines different modes of deformation during inversion. The presence of the salt horizon conditioned not only the structural style vertically, above and below the salt, but most importantly, they change from one to the other along strike across the transversal edges of the Triassic salts.

The results denote that the present salient shape of the Burgalesa Platform records a complex evolution linked to the inversion of pre-existent Mesozoic arched structures. This inherited configuration and the development of structures in the foreland limited the southward displacement forcing the strike-slip reactivation of the basement-involved inverted faults and the lateral extrusion of the detached Mesozoic Burgalesa Platform successions above the salt toward the SE overriding the Ebro foreland basin. The proposed evolution model is consistent with the surface data, including the fracture system, the available subsurface data and the mechanical stratigraphy.

#### 4.2.15 (o) Geometry and kinematics of the Axial, North Pyrenean and Sub Pyrenean Zones along the Nestes valley and Aquitaine Basin (Hautes-Pyrénées and Gers, France)

Paul Angrand<sup>1</sup>, Nicolas Espurt<sup>2</sup>, Stephane Brusset<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

The combined studies of the LR06 regional seismic line in the Aquitaine basin (Gers) and a cross section of about 44 km in the Nestes valley (Hautes-Pyrénées) allow us to characterize the structure of the Pyrenean Belt and its northern foreland basin.

The geometry and the deformation timing of the North Pyrenean front is complex and remains still unclear because of an interfering of thin-skin thrusting detached above the Triassic evaporites and thick-skin thrusting detached above the Silurian shales. Such contractional structures invert

albo-cenomanian extensional structures during the Alpine orogeny. The balanced cross section and sequential restoration is based on careful mapping in the Nestes valley and subsurface analysis (seismic profiles and well data) in the Aquitaine basin. The use of balanced cross sections allows us to quantify the structural architecture of the North Pyrenean Zone and to understand the tectonic hinges with the Axial Zone to the south and the Aquitaine foreland to the north.

The cross section along the LR06 seismic line records a total shortening of ~50 km, with at least 25-30 km caused by inversion of Cretaceous rifting structures. This rifting is associated with a strong crustal thinning, attested by the presence of lherzolite close to the section trace (Avezac lherzolite). A major thrust-system is identified in the Lannemezan area. It limits at its hanging-wall « Baronnies-type » duplexes made-of Rhaetian/mid-Cretaceous unit and at its footwall a typical « North Pyrenean » Mesozoic series.

#### 4.2.16 (o) Histoire du refroidissement des massifs de l'Arize et du Trois-Seigneurs (Ariège, Zone Nord-Pyrénéenne centrale) et implications tectoniques

Arnaud Vacherat<sup>1,2</sup>, Frédéric Mouthereau<sup>1</sup>, Raphaël Pik<sup>2</sup>, Nicolas Bellahsen<sup>1</sup>, Cécile Gautheron<sup>3</sup>, Matthias Bernet<sup>4</sup>, Bouchaïb Tibari<sup>2</sup>, Rosella Pinna<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>CRPG, Nancy

<sup>3</sup>GEOPS, Orsay

<sup>4</sup>ISTerre, Grenoble

Dans cette étude, nous nous intéressons aux massifs paléozoïques Nord-Pyrénéens de l'Arize et de Trois-Seigneurs (Ariège, zone Nord-Pyrénéenne centrale). Les datations existantes sur ces massifs (traces de fissions sur apatites) indiquent qu'ils ont enregistré une phase de refroidissement et d'exhumation du début de l'Eocène (55 Ma) au Miocène (20 Ma), associée à la collision des marges continentales ibériques et européennes.

Cependant, ces données ne contraignent pas correctement l'initiation de la convergence et de la collision. Plusieurs études (basées sur des thermochronomètres de plus hautes températures et sur la thermochronologie détritique) indiquent des âges de refroidissement plus anciens, remontant jusqu'au Crétacé Supérieur.

Pour mieux définir l'histoire du refroidissement et de l'exhumation de ces massifs depuis l'initiation de la convergence jusqu'au stade de développement d'une chaîne orogénique mature, nous apportons de nouvelles datations mesurées en couplant plusieurs thermochronomètres basses températures complémentaires (traces de fissions sur apatites et zircons, (U-Th-Sm)/He sur apatites et zircons). Ces données sont ensuite discutées à la lumière de contraintes structurales détaillées.

Notre étude montre qu'un premier épisode de refroidissement affectant les matériaux de la croûte moyenne, est synchrone d'une phase extensive Albo-Cenomanienne. Un second épisode de refroidissement débute lentement au Crétacé Supérieur et s'accélère durant l'Eocène. La comparaison des températures atteintes par ces massifs avec celles obtenues par RSCM dans les bassins environnants suggère une histoire significativement différente entre la couverture sédimentaire et ces massifs. Ces conclusions ont d'importantes implications sur l'évolution tectonique des Pyrénées et sur comment la convergence est accommodée dans les domaines Nord-Pyrénéens.

#### 4.2.17 (o) The role of salt tectonics in the evolution of the northeastern Pyrenees

Mary Ford<sup>1</sup>, Arjan Grool<sup>1</sup>, Frédéric Christophoul<sup>2</sup>, Eduard Saura<sup>3</sup>, Jaume Vergès<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy<sup>2</sup>GET, Toulouse<sup>3</sup>Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Institute of Earth Sciences Jaume Almera, Barcelona, Espagne

Evaporites can play a major role in controlling the architecture of external orogenic belts, both during extensional and subsequent compressional phases. However, salt can also 'hide' deformation due to its ability to flow and dissolve. The challenge is to recognise the imprint of its past presence and influence. In the NE Pyrenees multiple deformation phases have been identified based on locally anomalous stratigraphic and structural relationships. This has resulted in complex, sometimes incoherent and often conflictual models of orogenic history. For example, a pre-Cenomanian deformation phase has been interpreted as either extensional or compressional. As part of the ANR-PYRAMID project, we re-examine a series of key localities around the eastern Mouthoumet massif, in the Corbières foreland and along the Corbières thrust front to reconstruct a coherent deformation history involving salt tectonics.

Keuper (Carnian - Rhetian) evaporitic deposits gave rise to diapirs and detachments that were particularly active during Early to Late Cretaceous extension and later during Late Cretaceous to Eocene compression. Growth unconformities and rapid thickness changes in the Aptian Quillan basin indicate that it developed as a salt controlled minibasin. Olistoliths, gypsum breccias and presence of bipyramidal quartz in Albian strata preserved as footwall imbricates along the North Pyrenean thrust front (e.g. around Cucugnan) attest to the proximity of a large diapiric body. Below the Cenomanian unconformity, rotated fault blocks of Liassic to Albian strata lie above a Keuper detachment. These extensional fault blocks have already been recognised at the Serre de Bouchard. They are also preserved north of Cucugnan, and in the Montagne de Tauch with little or no alpine inversion.

In the Corbières foreland area salt influenced extensional and compressional deformation generated growth folds, with completely overturned limbs (flaps), welds, growth unconformities and pinched salt-cored anticlines. Several of these structures have generated considerable controversy in the past (Pinède de Durban, Boutenac anticline, Ripaud syncline). In the light on new advances in understanding salt related stratal and fault geometries we propose a new interpretation integrating halokinesis of these foreland structures.

#### 4.2.18 (o) Paleomagnetic database in the Pyrenees : an assessment

Emilio L. Pueyo<sup>1</sup>, Marí a José Ramón<sup>1</sup>, Geokin3dpyr Group<sup>2</sup><sup>1</sup>Instituto Geológico y Minero de España, Zaragoza, Espagne<sup>2</sup>Paleomagnetic Laboratory CCI-TUB-ICTJA CSIC, Spain. (3)

Department of Earth and Environmental Sciences, Lehigh University, Pennsylvania, USA. (4) Geodinámica Interna. Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Spain. (5) Lab. de paleomagnetismo.

Dpto. de Física. Universidad de Burgos, Spain. (6) Los Alamos National Laboratory, New Mexico, USA. LANL (7) Research Center for Human Evolution (CENIEH) Burgos - Espagne

Almar, Y(2) Anastasio, D(3) Beamud, E(2) Briz, JL(4) Calvín, P(4) Calvo, M(5) Casas, AM(4) Costa, E(2) Fernández, O(2) Garcés, M(2) Gil-Imaz, A(4) Gil-Peña, I(1) Hernández, R(1) Izquierdo-Lavall, E(4) Kodama, KP(3) Larrasoana, JC(1) Lewis, CJ(6) López, G(1) Mochales, T(1) Navas, J(1) Oliván, C(1) Oliva-Urcia, B(4) Parés, JM(7) Pérez-Rivarés, J(4) Pocoví, A(4) Pueyo-Anchueta, O(4) Ramajo, J(1) Rodríguez-Pintó, A(1) Sánchez, E(1) Sanmiguel, G(1) Silva-Casal, R(4) Soto, R(1) Sussman, AJ(6) Teletzke, AL(3) Vidal, O(2) Villalain, JJ(5)

Paleomagnetic studies have been conducted in the Pyrenees (and in its foreland basins) since the earlier sixties and have continued during

the next decades, particularly increasing in the nineties. At the moment, the research interest is still growing as regards of the increasing in number of publications. This vast amount of data is due to several reasons including the availability of synorogenic materials (allowing an accurate dating of deformation), excellent outcrops (including stratigraphic sequences with global interest), the existence of well-exposed zones of lateral transference of deformation (undergoing vertical-axis rotations) among other. This enviable frame has produced one of the densest and most homogeneous networks in orogenic zones of the world.

Until now, the compiled data derive from more than 400 references, including ≈200 indexed papers, >40 academic memories and other publications (proceedings, technical reports, etc). In total, we have compiled more than 30000 demagnetizations coming from more than 1800 sampling points, ≈150 of them are magstrat profiles (>85 kilometers of sections). A significant effort of data standardization was done during the last few years to precise the geographic, structural, and stratigraphic information as well as the quality of the raw paleomagnetic data. So far, most part of this information is available in the IGME's data servers (<http://www.igme.es/infoigme/visor/>). Additional improvements in both data accessibility and updating are still in progress. This compilation was carried out by the Geokin3DPyr group during the last ten years under the financial support of the Pyrenean Network (European INTERREG program). In this contribution we will show the state of the art of the dataset.

#### 4.2.19 (o) Transpression et inversion des failles normales créacées lors de la compression pyrénéenne (Plenzia - Armintza, Pays Basque espagnol)

Yohann Poprawski<sup>1</sup>, Christophe Basile<sup>2</sup><sup>1</sup>Géosciences Montpellier<sup>2</sup>ISTerre, Grenoble

Sur la côte du Pays Basque espagnol, la zone de Plenzia-Armintza présente de nombreuses failles normales synsédimentaires, actives de l'Albien au Santonien. Ces failles synsédimentaires sont identifiées sur le terrain, grâce à des dépôts gravitaires, des onlaps, des éventails et des variations d'épaisseur. Ces failles sont majoritairement de direction NE-SW, avec une famille mineure de direction N-S. Elles sont interprétées comme accommodant une extension de direction NW-SE, probablement oblique à la limite de plaque, pendant le Crétacé.

La majorité de ces failles sont réactivées en compression, lors de la phase pyrénéenne, postérieurement au dépôt des unités santoniennes. La déformation se traduit par des chevauchements vers le NNW, accompagnés de plis à axes horizontaux, d'axes NE-SW, déversés vers le NW et parallèles aux failles normales créacées. Ces plis se développent uniquement dans les unités ayant une rhéologie relativement plastique. Dans certains couloirs de failles orientés NE-SW, des plis dissymétriques à axes subverticaux montrent un cisaillement dextre, ce qui implique des processus de transpression. De plus, de nombreuses fentes de tension sont présentes dans les plis à axes horizontaux et sont orthogonales à ces derniers. Elles confirment l'existence d'une composante décrochante.

Le décrochement dextre est interprété comme étant le résultat d'un effet de bord associé au bloc Landais, un bloc de socle présent au nord de la zone d'étude, et soulevé pendant le Crétacé. Le raccourcissement pyrénéen, probablement orienté NNW-SSE induit l'extrusion latérale vers l'ouest de la zone d'étude, qui vient en « butée » contre ce bloc de socle. Cela induit des processus locaux de transpression dextre le long des failles héritées NE-SW.

#### 4.2.20 *Keynote communication* : **The changing structure of the Pyrenees along the northern Iberian Atlantic-Tethys connection / L'évolution de la structure des Pyrénées le long de la connexion Ibérie - Atlantique - Nord-Téthys.**

Jaume Vergès<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institut des Sciences de la Terre « Jaume Almera », Barcelone, Espagne*

Calculating the detailed movements of small tectonic plates involves serious difficulties because of their capability to move independently between large limiting plates and resulting in large-scale vertical axis rotations. The Iberian plate at the western boundary of the Tethys Ocean in Mesozoic and early-mid Tertiary times, is one of these puzzling micro-plates. The combined study of large scale plate motions together with geological observations is the only way to constrain the evolution of the Iberian plate despite arguable areas and time periods that need to be refined.

The Pyrenees formed by the partial underthrusting of Iberia beneath the European crust producing limited shortening of about ~150 km. The combination of this apparently reduced shortening and the endorheic (closed) post-tectonic evolution of its largest foreland basin (Ebro Basin) up to the early Late Miocene caused the preservation of syntectonic deposits providing an accurate time control for the Pyrenean fold belt evolution. In addition, a large number of research works on fission track cooling ages have been published in the last decade providing rock exhumation time constraints mostly within the basement antiformal stack as well in the Pyrenean foreland basins.

Recent compilations showing the variable compressional Tertiary structure along the strike of the Pyrenees as well as most recent advances on the configuration of the Pyrenean Mesozoic plate boundary have supported changes in the understanding of the Pyrenees chain that need to be framed again within the large scale setting. This larger scale context may include the southern boundary of the Iberian micro-plate along the Betic-Rif orogenic system as will be documented in this talk.

#### 4.2.21 (o) **Tectonic framework of the Sierras Interiores (South Pyrenean Zone)**

Lidia Rodríguez-Méndez<sup>1,2</sup>, Julia Cuevas<sup>1</sup>, José M. Tubía<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Universidad del País Vasco, Bilbao, Espagne*

<sup>2</sup>*Department of Earth Sciences, Royal Holloway University of London, Egham, Surrey, Royaume-Uni*

The Sierras Interiores fold-and-thrust belt, in the central Pyrenees, constitutes the contact between the South Pyrenean Zone and the Axial Zone. The Sierras Interiores comprises a sedimentary succession of Late Cenomanian to Paleocene age. The Triassic evaporites, a common decollement level in the South Pyrenean Zone, are absent because there is a stratigraphic lacuna from Triassic to Late Cretaceous times.

We propose the existence of two thrust systems in the area, the « upper thrust system » and the « deeper thrust system ». The « upper thrust system » duplicates Campanian (Marboré Sandstones) to Paleocene rocks. Footwall ramps with footwall synclines are common, corroborating the development of smooth trajectory thrusts that climb through the cores of break-thrust folds. The geometry of the thrusts in the upper system suggests a decollement level at the base of the Marboré Sandstones, where the thrust sole out. This decollement is equivalent to the Larra (Teixell, 1996) and Monte Perdido (Seguret, 1972) thrusts, to the west and east of the study area respectively. However, in the central part of the Sierras Interiores the thrusts also converge to the south generating a duplex

structure.

The « deeper thrust system » crops out all along the north face of the Sierras Interiores (minimum 24 km along strike) and duplicates Late Cenomanian to Early Campanian limestones. It constitutes the higher thrust of an antiformal stack made up by at least four Paleozoic-involving sheets in a probably piggy-back sequence. The « deeper thrust system » turns southwards into a detachment in the Triassic evaporites related with the emplacement of the Gavarnie nappe (Rodríguez et al., 2014). Later, S-vergent folds with axial plane foliation deform both thrust systems.

Rodríguez, L., Cuevas, J. and Tubía, J. M., 2014. *Journal of Geology*, 122, 99-111.

Seguret, M., 1972. *Pub. USTELA. Série Géologie Structurale* n° 2. Montpellier, 155 p.

Teixell, A., 1996. *Journal of the Geological Society* 153, 301-310.

#### 4.2.22 (o) **Apport d'une analyse 4D du réseau de fracturation d'un réservoir pour approcher son histoire cinématique. Exemple de l'anticlinal de Boltaña, Aragon, Espagne**

Maxime Vacelet<sup>1</sup>, Caroline Mehl<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Centre de Géosciences, École nationale supérieure des mines de Paris, Fontainebleau*

Les réservoirs carbonatés plissés constituent une part importante des réserves mondiales en hydrocarbures. L'étude du réseau de fractures (géométrie et dynamique de mise en place) permet une approche particulièrement précise de la cinématique de ces structures.

L'anticlinal de rampe de Boltaña est situé entre deux bassins sédimentaires de la zone sud pyrénéenne. Il résulte d'une histoire tectono-sédimentaire complexe datée de l'Eocène. Sa disposition suivant un axe N-S contraste fortement avec la tendance générale E-W de la chaîne des Pyrénées. Des études récentes montrent d'une part une croissance syn-sédimentaire de la structure, et d'autre part une rotation horaire syn-cinématique d'environ 50° autour d'un axe vertical.

Nous présentons ici les résultats d'une analyse cinématique conduite à partir de l'étude spatiale et temporelle du réseau de fractures. Celle-ci montre que la configuration actuelle de la structure de Boltaña résulte de cinq régimes de contraintes successifs. Les quatre premiers sont compressifs, ils entraînent la rotation puis le plissement du domaine de Boltaña et se terminent par un cisaillement général de l'anticlinal entre les bassins voisins. Le dernier régime de contraintes intervient au cours des derniers incréments de rotation et de croissance du pli. Il correspond à une phase extensive traduite par l'apparition d'un système de failles normales à transtensives impliquant les parties Est et Sud du domaine. Nous montrons que tous ces différents régimes pourraient être une décomposition locale d'une contrainte régionale (NNW-SSE) liée à la collision entre la plaque Ibérique et l'Eurasie. Tenant compte des précédents résultats et de notre propre étude, nous proposons une histoire cinématique inédite dans un cadre spatio-temporel précis. Nos conclusions précisent le cadre structural de la zone. Elles mettent en lumière un mode de mise en place original directement lié aux mouvements des nappes chevauchantes de la zone centrale sud pyrénéenne.

#### 4.2.23 (o) **Evolution structurale de la Zone Axiale occidentale des Pyrénées, héritage (thermique) et construction orogénique**

Nicolas Bellahsen<sup>1</sup>, Raphaël Pik<sup>2</sup>, Yoann Denèle<sup>3</sup>, Arnaud Vacherat<sup>1</sup>, Frédéric Mouthereau<sup>1</sup>, Léa Bayet<sup>1</sup>, Claudio Rosenberg<sup>1</sup>, Benoit Dubacq<sup>1</sup>, Matthias Bernet<sup>4</sup>, Abdelatif Lahfid<sup>5</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris  
<sup>2</sup>CRPG, Nancy  
<sup>3</sup>GET, Toulouse  
<sup>4</sup>ISterre, Grenoble  
<sup>5</sup>BRGM, Orléans

Si le calendrier tectonique le long du profil ECORS est relativement bien défini, il est moins contraint dans l'ouest de la zone axiale. De plus, la déformation interne des unités de socle est souvent peu décrite. Ainsi, le raccourcissement, potentiellement précoce, c'est à dire avant l'activation des grandes rampes crustales, est peu documenté et pris en compte dans les reconstructions de la chaîne.

Dans cette contribution, nous présentons des données structurales, microstructurales, thermochronologiques et thermométriques des déformations des granites de Bielsa (unités de Bielsa) et de Néouvielle (unité de Gavarnie). Tout d'abord, une nouvelle coupe de détail des déformations de l'unité de Bielsa est proposée, avec une attention spéciale aux déformations diffuses cassantes-ductiles associées au « plissement » du toit du socle. Ces déformations sont, à petite échelle, accommodées par des mylonites et cataclasites dont les mécanismes de déformation sont fortement contrôlés par la présence de phyllosilicates hydratés.

Les températures (maximales) associées sont de l'ordre de 300°C (thermométrie, thermochronologie, RSCM) et sont probablement partiellement dues à un héritage thermique. Des données U-Th-Sm/He sur Zircon et Apatite contraignent le chemin Température-temps de chacune des unités et sont utilisées pour mieux contraindre la séquence de raccourcissement de la zone axiale.

Enfin, les phyllosilicates semblent très précoces aux déformations alpines et répartis de manière diffuse dans la croûte. Cela semble avoir pour conséquence une distribution de la déformation Alpine et explique les « plis » de socle observés sur le terrain, et ce malgré les températures relativement basses (inférieures ou égales à 300°C). Les phyllosilicates et le gradient thermique élevé sont ainsi potentiellement responsables d'un affaiblissement de la croûte et d'une relative distribution de la déformation.

#### 4.2.24 (o) Les séries Campanien supérieur à Paléocène des Corbières témoignent-elles d'une phase de quiescence dans la formation du bassin d'avant pays Pyrénéen ?

Jean-Loup Rubino<sup>1</sup>, Baptiste Arnaud<sup>2</sup>, Manine Barrier<sup>3</sup>, Fabrice Malartre<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>2</sup>ENSG, Nancy

<sup>3</sup>TOTAL, Norge, Stavanger, Norvège

L'analyse stratigraphique et sédimentologique des séries dite Bégudorognacienne et Valdono-fuvélienne du massif des Corbières, situées autour du massif du Mouthoumet, notamment dans les synclinaux d'Albas, de Lagrasse, de Durban de Tournissan, de Termes et jusqu'à Alet et dans le Bas Languedoc au front de la Nappe de Corbières se caractérisent par une alternance de dépôts fluviaux alternant avec des dépôts palustres et lacustres. Les corrélations stratigraphiques fondées sur la caractérisation des limites de séquences érosives et des surfaces d'inondation lacustres sont remarquables. Elles permettent d'établir un canevas stratigraphique robuste au travers des différentes unités structurales. Outre la continuité des niveaux d'inondation lacustre qui témoignent d'une relative inter-connectivité des sous-bassins, qui s'étend d'ailleurs bien au-delà de la région d'étude ; l'isopacité globale de toutes ces formations (300m) est étonnante. En effet si l'on fait exception des unités de base qui reposent en onlap sur la discordance angulaire anté-Campanien Supérieur et scellent donc la première phase de déformation pyrénéenne, toutes les autres montrent un parallélisme sans commune

mesure avec les variations connues dans les bassins flexuraux et notamment dans le bassin sud pyrénéen ou à la même époque les variations sont énormes. A ceci il faut ajouter que grâce à une très bonne calibration magnétostratigraphique dans le synclinal d'Albas (Galbrun, 1997) et des datations dans le Paléocène ; la durée de l'intervalle (20My) est très bien contrainte. Ce qui fait une vitesse de sédimentation de 15m/My, vitesse sans comparaison avec celle des bassins flexuraux. Malgré son caractère préliminaire on en conclut que soit la zone se comportait comme un bourrelet périphérique peu subsident pendant la période et sans migration des dépôts centres, (phase de quiescence) soit que le canevas structural beaucoup plus complexe, fait que notre grille d'analyse est insuffisante.

#### 4.2.25 (o) Evolution du bassin d'Aquitaine à l'Eocène (réponse du retroforeland aux principales phases de compression pyrénéennes)

Carole Ortega<sup>1</sup>, Olivier Serrano<sup>1</sup>, Eric Lasseur<sup>1</sup>, François Guillocheau<sup>2</sup>, Philippe Razin<sup>3</sup>, Cécile Robin<sup>2</sup>, Laurent Vallet<sup>4</sup>, Antoine Jacques<sup>5</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>Géosciences Rennes

<sup>3</sup>ENSEGID, Pessac

<sup>4</sup>Aquila conseil, Toulouse

<sup>5</sup>TIGF, Cugneaux

L'évolution Eocène du Bassin d'Aquitaine correspond à la période de déformation principale des Pyrénées avec la mise en place des principaux chevauchements, le soulèvement de la zone axiale. L'objectif de ce travail est sur la base de profils sismiques régionaux et de transects de corrélations diagraphiques de mieux caractériser la réponse du retroforeland qu'est le bassin d'Aquitaine. Cette approche de subsurface permet de caler temporellement les phases de déformation, et la réponse sédimentaire à partir de l'identification des géométries sédimentaires d'âge Eocène. Nous montrons ici la réorientation majeure du bassin durant la fin de l'Yprésien, et les géométries sédimentaires associées (Sables de Baliros, sables inframassiques...). Les géométries sédimentaires du Lutétien à l'Oligocène qui correspondent à la phase de comblement majeure en contexte tectonique actif et au passage progressif à un bassin suralimenté sont également analysées montrant un système complexe de prismes progradants successifs et un scellement progressif des structures au Bartonien, et enfin les géométries associées à la continentalisation généralisée du bassin du Priabonien à l'Oligocène. Notre approche permet de mieux caler l'âge des déformations, de définir le style des déformations associées et le type de réponse du bassin qu'il est possible de recaler avec les principales déformations identifiées dans la chaîne pyrénéenne.

#### 4.2.26 (o) Paléocirculations de fluides et thermicité du bassin d'avant-pays sud pyrénéen : une approche multi-analytique

Nemo Crognier<sup>1</sup>, Guilhem Hoareau<sup>1</sup>, Brice Lacroix<sup>2,3</sup>, Charles Aubourg<sup>1</sup>, Michel Dubois<sup>4</sup>, Abdeltif Lahfid<sup>5</sup>, Pierre Labaume<sup>6</sup>, Isabel Suarez-Ruiz<sup>7</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, pau

<sup>2</sup>Department of Earth and Environmental Sciences University of Michigan, Ann Arbor, États-Unis

<sup>3</sup>Institut des Sciences de la Terre, Université de Lausanne, Suisse

<sup>4</sup>LGCgE, Lille

<sup>5</sup>BRGM, Orléans

<sup>6</sup>*Géosciences Montpellier*

<sup>7</sup>*Instituto Nacional del Carbon, Oviedo, Espagne*

L'histoire tectono-sédimentaire du bassin d'avant-pays sud Pyrénéen est bien contrainte. Cependant, ce n'est que récemment que les questions liées au régime paléohydrologique et à la thermicité du bassin sud pyrénéen ont été abordées. Les études centrées sur l'Est du bassin de Jaca ont montré une compartimentation de la circulation de fluides dans les chevauchements de Gavarnie (eau métamorphique), du mont Perdu (eau de formation) et de Jaca (eau météorique). D'autres études ont montré que les températures maximales dépendent de l'enfouissement et ne sont pas impactées par la circulation de fluides. Notre étude préliminaire géochimique, isotopique et microthermométrie sur inclusions de fluides, qui se concentre sur des échantillons provenant de la zone de Torla (Est du bassin de Jaca), a mis en évidence d'une part, la circulation d'un fluide peu salé (eau de formation) riche en méthane et en carbone organique dans un système clos, et d'autre part une diminution des températures de cristallisation des veines du Nord vers le Sud, impliquant l'existence d'une anomalie positive des températures ( $T_h > 200^\circ\text{C}$  à Torla contre  $T_h = 120^\circ\text{C}$  dans le reste du bassin) et du gradient géothermique ( $100^\circ\text{C}/\text{Km}$ ). Compte tenu de la fermeture probable du système paléohydrologique dans la zone de Torla, il semble actuellement difficile d'expliquer cette anomalie par la circulation d'un fluide externe en déséquilibre thermique. Nous envisageons par la suite établir une cartographie complète du régime paléohydrologique du bassin de Jaca, pour déterminer ses liens éventuels avec l'évolution tectonique et thermique de cette partie du bassin d'avant-pays sud-pyrénéen. Il sera ainsi possible de réintégrer les valeurs obtenues à Torla dans un modèle global de paléohydrologie et de thermicité du bassin.

#### 4.2.27 (o) The role of the Ebro Massif as a source area for the clastic systems of the south-central Pyrenean Basin

Marta Roige<sup>1</sup>, David Gómez-Gras<sup>1</sup>, Eduard Remacha<sup>1</sup>, Salvador Boya<sup>1</sup>, Antonio Teixell<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Dept. de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, Espagne*

The south-central Pyrenean Basin constitutes a good natural laboratory to investigate changes in sediment routing and composition in parallel to the tectonostratigraphic evolution of a foreland basin. The Pyrenees is an inverted Alpine orogen that developed diachronously from east to west. The complex tectonic setting and the interference of various depositional systems during the infill of the basin hinder the characterization of the sediment provenance. A detailed petrological analysis carried out in case areas leads to identify the compositional changes to better understand the evolution of the sediment sources throughout the development of the foreland basin. During Late Cretaceous to Mid Eocene times, the Ager and Tremp basins contained deltaic and fluvial systems that evolved to the distal time equivalents of the Ainsa-Jaca basins. Our provenance results show that the clastic systems from both Ager and Tremp basins were derived from different source areas in different times. These changes can be identified in the latest Cretaceous Garumian facies, which in the Tremp basin show an interference of two source areas situated to the east and to the north, while the correlative deposits of the Ager basin show distinct compositional features implying a southern source area. According to the petrological composition, we find the Ebro Massif as the most likely source for these sediments, which acted as a forebulge. As for younger sedimentary units, supply from a south-derived source in the Ager basin can be also identified in the Eocene deltaic and fluvial systems, having implications in the final composition of the slope and basin plain turbiditic deposits of the Ainsa-Jaca basins. Although the Ebro Massif acted as source area only episodically during specific intervals of the basin evolution, its clear

provenance signature emphasizes an important role of the cratonic margin of the South Pyrenean foreland basin which has been overlooked up to date.

#### 4.2.28 (o) High resolution imaging of the deep Pyrenean architecture from the data of the PYROPE and IBERARRAY seismological experiments

Sébastien Chevrot<sup>1</sup>, Matthieu Sylvander<sup>1</sup>, Antonio Villaseñor<sup>2</sup>, Jordi Diaz<sup>2</sup>, Mario Ruiz<sup>2</sup>, Anne Paul<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*IRAP, Toulouse*

<sup>2</sup>*Institute of Earth Sciences Jaume Almera, Barcelona, Espagne*

<sup>3</sup>*ISTerre, Grenoble*

Between 2010 and 2013, two temporary deployments, the PYROPE and IBERARRAY experiments, covered both sides of the Pyrenees with a dense backbone of broadband stations. These two seismological experiments dramatically improved the station coverage in the Pyrenees, offering new opportunities to constrain the deep lithospheric architecture, which is still poorly known. We will present the results of a regional tomographic study, obtained from the exploitation P and PKP travel time residuals. The most salient feature of our tomographic model is the segmentation of lithospheric structures along major NE-SW transfer faults, such as the Pamplona and Toulouse faults. To complement the 2-D deployments, two dense transects were also deployed across the central and western Pyrenees, approximately following the ECORS-Pyrenees and ECORS-Arzacq lines. The migration of teleseismic P waves converted to S on internal seismic discontinuities allows us to map the detailed geometry of lithospheric interfaces beneath these two transects. The migrated sections provide strong evidence for the subduction of a thinned Iberian crust down to at least 80 km depth. These preliminary results support the increasingly popular idea that the Pyrenees were produced by the tectonic inversion of a segmented rift now buried by subduction beneath the European plate.

#### 4.2.29 (o) Dynamique des réseaux hydrographiques et morphologie du piedmont nord-pyrénéen

Stéphane Bonnet<sup>1</sup>, Sébastien Carretier<sup>1</sup>, Frédéric Christophoul<sup>1</sup>, Vincent Regard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*GET, Toulouse*

Le piedmont nord-pyrénéen est constitué d'un ensemble de réseaux hydrographiques qui s'écoulent principalement vers l'Atlantique (réseaux de la Garonne et de l'Adour). Dans la partie centrale du piedmont, ce réseau montre une géométrie générale divergente qui lui vaut historiquement l'appellation d'« éventail gascon », et plus récemment de « cône de Lannemezan ». De nombreuses évidences morphologiques indiquent une mobilité importante des réseaux hydrographiques sur l'ensemble du piedmont nord-pyrénéen durant le quaternaire, via des processus de captures ou de diversion par exemple. Sur la base de ces observations nous proposons un schéma de réorganisation des réseaux hydrographiques qui, couplé à des modélisations numériques et expérimentales permet de discuter des influences relatives des paramètres tectoniques, climatiques et eustatiques sur la morphologie du piedmont nord-pyrénéen.

#### 4.2.30 (o) Paléoaltitude des sommets pyrénéens d'après l'analyse pollinique

Jean-Pierre Suc<sup>1</sup>, Séverine Fauquette<sup>2</sup>, Speranta - Maria Popescu<sup>3</sup>, Frédéric Mouthereau<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>ISEM, Montpellier

<sup>3</sup>GeoBioStratData.Consulting, Rillieux la Pape

Une double approche d'évaluation des paléoaltitudes des reliefs a été élaborée sur la base des enregistrements polliniques et de leur quantification climatique (Fauquette et al., 1998), d'une part à partir des bassins sédimentaires littoraux (Fauquette et al., 1999), d'autre part pour les bassins sédimentaires soulevés (Suc & Fauquette, 2012).

Son application aux Pyrénées orientales suggère que le demi-graben de la Cerdagne s'est soulevé en même temps que les sommets qui l'entourent (Puigmal, Carlit, Canigou), selon une progression partant de 200 m environ il y a 10 Ma (Tortonien), passant par 600 m à 6 Ma (Messinien) pour atteindre 1100 m aujourd'hui (Suc & Fauquette, 2012). Le dénivelé entre ce bassin sédimentaire et les sommets environnants semble être demeuré constant, de l'ordre de 2000 m, au cours du soulèvement (Suc & Fauquette, 2012).

La méthode a été étendue à l'ensemble du piémont nord-pyrénéen dans le cadre de l'ANR « PYRAMID ». Les premiers résultats concernent l'Eocène inférieur au sud de Pau où, dans un contexte littoral tropical d'arrière-mangrove, n'a été perçu qu'un étagement de végétation d'altitude moyenne ne dépassant pas les 1200 m. Cette première estimation n'est pas en contradiction avec l'évaluation d'un relief autour de 2000 m pour la même période pour le versant sud-pyrénéen (Huyghe et al., 2012) dans l'hypothèse d'une élévation dissymétrique de la chaîne (Sinclair et al., 2005).

Fauquette S., Clauzon G., Suc J.-P., Zheng Z., 1999. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 170, 35-47.

Fauquette S., Guiot J., Suc J.-P., 1998. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 144, 183-201.

Huyghe D., Mouthereau F., Emmanuel L., 2012. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 345-348, 131-141.

Sinclair H.D., Gibson M., Naylor M., Morris R.G., 2005. *Amer. J. Sci.*, 305, 369-406.

Suc J.-P., Fauquette S., 2012. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 321-322, 41-54.

#### 4.2.31 (o) A Late Holocene deep-seated landslide in the northern French Pyrenees

Thomas Lebourg<sup>1</sup>, Edouard Palis<sup>1</sup>, Jérémy Giuliano<sup>1</sup>, Swann Zéathe<sup>2</sup>, Maurin Vidal<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>2</sup>ISTerre, Grenoble

A very large deep-seated landslide (DSL) in the northern Pyrenees with over ~1400 million cubic meters was examined, mapped, and dated by lake sediment rates and <sup>10</sup>Be terrestrial cosmogenic radionuclide surface exposure (CRE) dating. Our analysis reveals the role of inherited structures in the landslide process, and we highlight typical gravitational morpho-structures and a small lake trapped at the toe of the landslide headscarp. The study of the lake helps provide us with the approximate age of the landslide, through calculations based on sedimentation rates ( $0.86 \pm 0.57$  mm yr<sup>-1</sup>). Using these, we find the earliest formation of the lake following the landslide to be  $1106 \pm 540$  yr. To better constrain the timing of the landslide, we applied <sup>10</sup>Be CRE dating and they highlight two main destabilization phases. Finally, we discuss the different triggering factors responsible for the main failure. Information, arguments,

and evidence relating to historic markers, and especially to the absence of particular climate markers, point to a single event at 1380 yr. This argument is supported by the absence of major climate change during Dark Ages. The hypothesis of a single event scenario is supported by a major seismic event that occurred around 1380 yr (Lavedan earthquake).

#### 4.2.32 (o) The Miocene Lannemezan Megafan : a record of the Late-Cenozoic evolution of the northern Pyrenean foreland

Margaux Mouchene<sup>1</sup>, Peter Van Der Beek<sup>1</sup>, Frédéric Mouthereau<sup>2</sup>, Julien Carcaillet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>ISTeP, Paris

The most striking morpho-sedimentary feature of the northern Pyrenean foreland is the Miocene Lannemezan megafan. It was built from Early Miocene to Pliocene times, while active deformation of the central Pyrenees (in particular its northern retro-wedge) had already ceased - although the exact timing of the end of the deformation remains disputed. The controls on the evolution of the fan thus remain elusive : what controlled the development of the fan and how is this related to the orogenic growth? What was the post-orogenic evolution of the sediment flux, subsidence and source-to-sink relationships? How large was the fan when it was active? When and why was it abandoned and incised? We combine a quantitative morphometric analysis with field observations and cosmogenic dating to address these questions and assess the post-orogenic evolution of the northern central Pyrenees.

The Lannemezan fan is exceptionally large, especially when compared to the other fans of the northern Pyrenean foreland and its fan area/catchment area ratio is anomalous. Calculations of the eroded vs. deposited volumes corroborate this unbalanced budget. The Neste River, which most likely used to feed the megafan, now bends 90° eastwards near the apex of the fan, indicating it was captured by the larger Garonne River in Quaternary times. The material forming the fan and the strath terrace system incising the fan shows rather unusual sedimentological characteristics for an alluvial fan setting, characterized by a very fine clay and sand matrix supporting sporadic pebbles and boulders. We show that the terrace slope increases with time and the current rivers exhibit markedly concave long profiles, which could indicate late tilting of the fan. New cosmogenic nuclide analyses (<sup>10</sup>Be, <sup>26</sup>Al) are used to date the abandonment of the fan surface and the terrace staircase chronology to provide constraints on incision rates and mechanisms (in terms of climatic change and/or tectonic deformation).

#### 4.2.33 (o) Séismicité de la bordure nord des Pyrénées centrales et occidentales : une conséquence de la subsidence de blocs denses exhumés dans la croûte supérieure

Annie Souriau<sup>1</sup>, Alexis Rigo<sup>1</sup>, Matthieu Sylvander<sup>1</sup>, Sébastien Benahmed<sup>1</sup>, Frank Grimaud<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IRAP, Toulouse

La plupart des séismes pyrénéens récents ont des mécanismes en faille normale, suggérant que la chaîne est actuellement en extension. Ces séismes sont cependant mal répartis le long de la chaîne, si bien que le régime de contrainte et son lien avec la sismicité restent des sujets débattus.

Afin d'apporter des éléments de réponse à cette question, nous avons analysé la sismicité dans la partie centrale-occidentale des Pyrénées françaises, qui est la plus active de la chaîne, avec de façon récurrente

des événements de magnitude relativement élevée ( $M > 4$ ). Les cartes de sismicité obtenues à différents profondeurs révèlent des propriétés périodiques singulières dans la distribution des foyers, avec en particulier une distribution en festons dans les 4 premiers kilomètres de la croûte, et des rassemblements en "clusters" vers 8 km de profondeur. La plupart des forts séismes se produit à la base de la croûte supérieure. La superposition de la sismicité avec les anomalies de gravité (gradient vertical de l'anomalie de Bouguer) montre que la plupart des séismes se situent à la bordure sud des anomalies positives, qui correspondent à des blocs de croûte inférieure piégés dans la croûte supérieure pendant la convergence pyrénéenne. Nous proposons que la sismicité actuelle résulte de la subsidence de ces blocs denses qui ont été précédemment exhumés à l'intérieur de bassins pull-apart. Ce scénario explique simultanément la distribution géographique des séismes, leur distribution en magnitude, et la prédominance de mécanismes en faille normale dans cette partie de la chaîne. Dans ce contexte, les mécanismes au foyer normaux n'impliquent pas nécessairement une extension nord-sud, et peuvent même être compatibles avec une faible compression nord-sud si celle-ci reste inférieure à la contrainte verticale. Ce résultat suggère également que le régime de contrainte n'est probablement pas homogène tout au long de la chaîne.

#### 4.2.34 (p) Du rifting à l'inversion pyrénéenne dans le Bassin d'Aquitaine : interprétation du profil sismique St-Pé de Bigorre-Condorm

Charly Poitevin<sup>1</sup>, Pierre Labaume<sup>1</sup>, Aurélien Gay<sup>1</sup>, Antonio Teixell<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier

<sup>2</sup>Dpt. de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, Espagne

Localisé au nord du chevauchement frontal N-pyrénéen (CFNP), le Bassin d'Aquitaine correspond au haut de la marge européenne du bassin extensif mésozoïque N-pyrénéen et a enregistré la subsidence d'avant-chaîne et les déformations compressives les plus septentrionales lors de l'inversion pyrénéenne. Bien que ce bassin ait fait l'objet d'investigations pétrolières approfondies, seules quelques coupes structurales générales ont été publiées à ce jour. Nous présentons une nouvelle interprétation d'un profil sismique situé au nord des Chaînons Béarnais, qui représentent la Zone N-Pyrénéenne (ZNP) dans sa partie centre-ouest. Une coupe structurale équilibrée déduite du profil est restaurée aux différents épisodes-clé de l'histoire tectonique et intégrée avec une nouvelle coupe de la ZNP. Des courbes de subsidence sont présentées pour les différents domaines structuraux. Dans la partie sud du profil, un horst de socle d'âge crétacé, le Haut de Grand-Rieu (HGR), sépare les Chaînons Béarnais du Bassin d'Aquitaine. La bordure sud du HGR a localisé le CFNP, qui correspond à un vaste pli de propagation d'extrémité de faille comportant deux branches aveugles et une branche émergente hors-séquence. Des éventails stratigraphiques indiquent une activité essentiellement Eocène. Au nord du HGR, le dépôt-centre crétacé inférieur de Tarbes, érodé à la fin de l'extension, est recouvert en « onlap » par les flyschs du Crétacé supérieur. Le HGR ayant bloqué la propagation vers le nord du CFNP, la déformation compressive pyrénéenne est très limitée dans le reste du bassin. Localisée sur quatre structures, dont un diapir et deux 1/2 grabens crétacés inversés, et marquée par des éventails dans le Tertiaire, cette déformation est probablement enracinée dans un jeu inverse de la bordure nord du HGR. La présence et le rôle du HGR est caractéristique de la partie du bassin d'Aquitaine située au nord des Chaînons Béarnais, en contraste avec les secteurs situés plus à l'est et à l'ouest.

#### 4.2.35 (p) Héritage thermique extensif dans les Pyrénées

Arnaud Vacherat<sup>1,2</sup>, Frédéric Mouthereau<sup>1</sup>, Raphaël Pik<sup>2</sup>, Matthias Bernet<sup>3</sup>, Cécile Gautheron<sup>4</sup>, Emmanuel Masini<sup>5</sup>, Laetitia Le Pourhiet<sup>1</sup>, Bouchaïb Tibari<sup>2</sup>, Abdeltif Lahfid<sup>6</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>CRPG, Nancy

<sup>3</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>4</sup>GEOPS, Orsay

<sup>5</sup>IPG Strasbourg

<sup>6</sup>LGE, Paris

Comment l'héritage thermique extensif affecte l'évolution d'une orogène est encore débattu à ce jour. Le bassin de Mauléon au nord-ouest des Pyrénées a enregistré une phase d'amincissement crustal extrême jusqu'à ~ 100 Ma suivie d'une phase d'inversion tectonique à partir de ~ 80 Ma, ce qui en fait une zone d'étude parfaite pour répondre à cette problématique.

Pour contraindre les histoires temps-température enregistrées dans le bassin, nous apportons de nouvelles données thermochronologiques basse température (traces de fission et (U-Th-Sm)/He sur zircons). Pour comprendre l'influence des processus extensifs sur la collision orogénique, nous avons inversé ces données et les avons combinées à une modélisation thermo-cinétique 1D d'un cycle extension-collision.

Nous montrons que le bassin de Mauléon a enregistré une phase importante de réchauffement à partir de l'albien (~ 100 Ma) caractérisée par un gradient thermique élevé (jusqu'à ~ 80°C/km) et ce même après l'inversion, pendant ~ 30 Ma. Nos résultats sont cohérents avec l'hypothèse d'un manteau sous-continentale exhumé sous le bassin. Cette étude suggère que la déformation ductile provoquée par l'inversion d'unités affectées par de hautes températures n'est pas uniquement liée à l'enfouissement de ces unités ce qui a de fortes implications sur les modèles de reconstructions cinématiques.

#### 4.2.36 (p) Relations sources - bassins au Nord des Pyrénées contraintes par thermochronologie détritique

Arnaud Vacherat<sup>1,2</sup>, Frédéric Mouthereau<sup>1</sup>, Raphaël Pik<sup>2</sup>, Jean-Louis Paquette<sup>3</sup>, Frédéric Christophoul<sup>4</sup>, Bouchaïb Tibari<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>CRPG, Nancy

<sup>3</sup>LMV, Clermont-Ferrand

<sup>4</sup>GET, Toulouse

Reconstruire l'évolution à long terme des bassins versants dans une chaîne de collision est clé pour décider quels sont les facteurs, entre le climat et la tectonique, qui contrôlent l'évolution du paysage, ainsi que l'échelle de temps considérée par les processus de transfert mis en jeu dans l'avant-pays et/ou dans la chaîne.

Dans cette étude, nous nous intéressons aux Pyrénées. Le flanc nord du prisme orogénique est caractérisé par l'inversion de bassins de rift hyper-étirés soumis à des histoires thermique particulières ayant affectées la façon dont la marge a été inversée pour former le paysage actuel. Ces contraintes ont été bien décrites sur le flanc sud de la chaîne mais le flanc nord a été très peu étudié à ce jour. C'est pourquoi, nous apportons de nouvelles données U/Pb sur zircons détritiques provenant des séries Albo-Cénomaniennes à Tertiaires à l'ouest et au centre de la Zone Nord-Pyrénéenne et du sud du bassin d'Aquitaine. Ces âges obtenus sont ensuite comparés aux données existantes sur les directions de paléo-courants, les histoires de refroidissement et d'exhumation des massifs et les âges des sources potentielles afin d'établir une reconstruction paléogéographique alliant à la fois le sud et le nord des Pyrénées. Cette étude montre que d'après l'évolution de la ligne de partage

des eaux, la chaîne des Pyrénées n'est pas cylindrique. L'évolution des sources qui remplissent les bassins montre également que l'érosion des massifs hercyniens au nord des Pyrénées débute vers la fin du Crétacé ce qui implique que le développement d'important relief dès le début de la convergence ne se reflète pas automatiquement dans les taux de sédimentation enregistrés.

#### 4.2.37 (p) Relations entre manteau, paléozoïque et mésozoïque au pied du massif du St-Barthélémy : la coupe de Bestiac, Ariège

Michel De Saint Blanquat<sup>1</sup>, Patrick Monié<sup>2</sup>, Pierre Labaume<sup>2</sup>, Yves Lagabrielle<sup>3</sup>, Camille Clerc<sup>3</sup>, Alexandre Boutin<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier

<sup>3</sup>Géosciences Rennes

<sup>4</sup>ISTO, Orléans

<sup>5</sup>Imerys talc, Toulouse

Dans la région de Bestiac, en haute-Ariège, une coupe nord-sud d'une peine plus d'un kilomètre de long centrée sur la zone nord-pyrénéenne métamorphique montre les relations entre le socle anté-alpin (gneiss granulitiques et série paléozoïque) du massif nord-pyrénéen du St Barthélémy et de la zone axiale, et la série mésozoïque constituée principalement de marbres et de brèches carbonatées à éléments de lherzolite, mais aussi du flysch crétacé supérieur.

A partir de nouvelles données cartographiques, structurales, métamorphiques et géochronologiques, nous montrons les modalités de l'extension dans le socle varisque (comment 'escamoter' la croûte sans 'trop' l'étirer ?), et comment celle-ci a précédé la mise à la surface du manteau et la formation du complexe bréchiq. Ces données nous permettent de caractériser l'importance de l'héritage varisque dans la structuration alpine, mais aussi de poser la question de l'impact des déformations alpines dans ce qui est considéré comme varisque. Enfin, la restauration de la coupe nous permet d'aborder la question de la géométrie 3D du système au Crétacé, et des rôles respectifs des composantes extensives et décrochantes.

#### 4.2.38 (p) Les sédiments détritiques au contact des péridotites dans la région de Lherz (Zone Nord-Pyrénéenne) : diversité lithologique et implication pour les modalités de l'exhumation du manteau

Yves Lagabrielle<sup>1</sup>, Camille Clerc<sup>1</sup>, Thibault Charlier<sup>1</sup>, Benjamin Corre<sup>1</sup>, Michel Ballèvre<sup>1</sup>, Serge Fourcade<sup>1</sup>, Jean-Marie Dautria<sup>1</sup>, Violaine Vignon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

<sup>2</sup>ISTO, Orléans

<sup>3</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>4</sup>Géosciences Montpellier

Les lherzolites de l'étang de Lherz, de Freychinède et de Berqué sont associées à des métasédiments détritiques contenant des fragments dominants de manteau et de marbres issus du démantèlement de la couverture métamorphique mésozoïque de la Zone Nord-Pyrénéenne (ZNP). Les relations originelles entre le socle ultrabasique et ces brèches et microbrèches ne sont pas toujours accessibles, mais on peut observer en quelques endroits des caractères de contacts sédimentaires (surface irrégulière, anfractuosités emplies de microbrèches, remaniement de la lherzolite serpentinisée). La matrice des brèches est invariablement constituée de grains issus du démantèlement du manteau serpentinisé

ou non (Ol, CPX, OPX, spinelles, serpentines). Ce cortège ultrabasique est associé à des fragments de marbres souvent foliés portant déjà l'empreinte du métamorphisme HT pyrénéen. On trouve également en grande quantité de petites phyllites dont l'origine est soit détritique, soit métamorphique, par cuisson de la brèche lors d'un stade tardif métamorphisme HT crétacé. Sur le corps de Lherz, la composition des clastes des brèches évolue entre un pôle 100% carbonaté et un pôle 100% ultrabasique. Par endroit, les carbonates envahissent la péridotite serpentinisée qui prend alors l'aspect typique des ophicalcites. En plusieurs points, à la périphérie immédiate des corps de Lherz et de Freychinède et dans les fentes au sein des lherzolites de Berqué, affleurent les roches à saphirine (voir Monchoux, 1973) faites de lits de minéraux souvent bien triés et de microbrèches dont la composition, surprenante, associe un cortège ultrabasique à un cortège singulier de débris de métaévaaporites et de métaophites (phlogopites, anthophyllites, enstatites, hornblendes,...). La mise à nu du manteau dans la ZNP au Crétacé s'accompagne donc du démantèlement de toute la couverture métamorphique préifit, depuis le Trias jusqu'au Crétacé. Cette contrainte est intégrée dans le modèle d'exhumation proposé pour cette partie de la ZNP. Ce modèle tente de rendre compte également de la présence au sein du corps principal des brèches de Lherz (vallon de Fontête Rouge) de rares fragments d'un croûte continentale à affinité granulitique.

#### 4.2.39 (p) Mesure par gravimétrie du surcreusement de deux vallées glaciaires pyrénéennes

Stéphane Perrouty<sup>1,2</sup>, Béragé Moussirou<sup>1</sup>, Joseph Martinod<sup>1</sup>, Sylvain Bonvalot<sup>1</sup>, Sébastien Carretier<sup>1</sup>, Germinal Gabalda<sup>1</sup>, Gérard Héraïl<sup>1</sup>, Bernard Monod<sup>3</sup>, Vincent Regard<sup>1</sup>, Dominique Remy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Western University, Earth Sciences Department, Canada

<sup>3</sup>BRGM, Direction régionale Midi-Pyrénées, Ramonville-Saint-Agne

A l'aide de l'interprétation de mesures gravimétriques, nous proposons une estimation de l'épaisseur du remplissage quaternaire post-glaciaire de deux vallées du versant nord des Pyrénées : la vallée du Gave de Pau entre Pierrefite-Nestalas et Lourdes, et la vallée de la Garonne entre Saint Bât et Saint Bertrand de Comminges. Dans la vallée de la Garonne, nous avons acquis 64 mesures de pesanteur à l'aide d'un gravimètre Scintrex CG5. Ces mesures ont été complétées de 44 données extraites du catalogue du Bureau Gravimétrique International. Dans la vallée du Gave de Pau, 120 stations nouvelles ont été mesurées, complétées de 30 mesures extraites du catalogue du BGI.

A partir des mesures de pesanteur, nous calculons les anomalies de Bouguer complètes, puis la forme de l'anomalie de Bouguer régionale déduite des stations implantées sur le substratum anté-Quaternaire. En soustrayant la régionale à l'ensemble de nos mesures, nous obtenons des cartes d'anomalies résiduelles. Quasiment toutes les stations implantées sur des dépôts quaternaires montrent des anomalies résiduelles négatives, ce qui traduit un déficit de masse lié à la faible densité des sédiments quaternaires peu compactés. Ces anomalies dépassent 4 mgal au centre des parties les plus larges des ombilics glaciaires. En l'absence de données de sondages profonds permettant de caler nos mesures, il est nécessaire de faire des suppositions sur le contraste de densité existant entre les sédiments quaternaires et le substratum pour déterminer l'épaisseur du remplissage. Les profondeurs maximales du surcreusement peuvent atteindre 200 mètres, pour des vallées dont la largeur n'excède pas 2 km. Nous avons reconstruit le profil en long de la base des deux glaciers. Ces profils montrent des surcreusements importants à la confluence des langues glaciaires. Cette morphologie se surimpose au contrôle exercé par la lithologie du substratum.

#### 4.2.40 (p) Evolution tectono-stratigraphique du bassin d'avant-pays nord-Pyrénéen

Frédéric Christophoul<sup>1</sup>, Mary Ford<sup>2</sup>, Arjan Grool<sup>2</sup>, Louis Hemmer<sup>2</sup>,  
 Géraldine Rougier<sup>2</sup>, Larissa Ngombi Mavoungou<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>CRPG, Nancy

Le rétro-bassin d'avant-pays des Pyrénées a fait l'objet d'une importante exploration dans sa partie ouest. La partie est du bassin, moins explorée bénéficie de bonnes conditions d'affleurement. La structure du bassin d'avant-pays paraît cylindrique, elle révèle des différences d'est en ouest. A partir de l'intégration des données de subsurface, de terrain, bibliographiques, la construction de coupes structurales et la reconstitution de l'histoire de subsidence, il est possible de mettre en évidence l'évolution tectonostratigraphique du bassin. En termes de chronologie, les principaux dépocentres sont contemporains le long du bassin : 1) Campano-Maastrichtien, 2) Eocène inférieur (Ilerdien Marin), 3) Eocène sup.-Oligocène (Fm de Palassou /molasses). En termes de localisation des dépocentres, des différences apparaissent entre l'Est et la partie centrale du bassin. Dans les Corbières et la vallée de l'Aude, les dépocentres migrent du sud vers le nord entre le CFNP et le front de la Montagne d'Alaric, entre le Crétacé supérieur et l'Eocène supérieur et sont associés à des sous-bassins séparés, contrôlés par des plis de propagation. Ces structures s'amortissent à l'ouest de la vallée de l'Aude. Dans le Plantaurel et les Petites Pyrénées, les dépocentres Crétacé sup. et Eocène montrent une migration vers le nord entre la ZSP et le FPP. Ces dépocentres se superposent partiellement montrant une progradation vers le nord. Le dépocentre Crétacé sup et Eocène inf. sont contrôlés par la croissance du CFNP, celui de l'Eocène sup-Oligocène par le FPP. A l'ouest de la faille de Muret des structures salifères reprisent en chevauchement apparaissent. Ces différences de localisation des dépocentres mettent en évidence : 1) le rôle de l'héritage hercynien dans le substratum de l'avant-pays (Massif de Mouthoumet et faille de Muret), 2) le rôle du sel dans la géométrie des structures et notamment la paléogéographie du Trias supérieur.

#### 4.2.41 (p) Amount, timing and kinematics of deformation along a section through in the retrowedge of the Eastern Pyrenees, inversion of a highly extended, salt-rich rift system

Mary Ford<sup>1</sup>, Frédéric Christophoul<sup>1</sup>, Maxime Prevost<sup>1</sup>, Arnaud  
 Vacherat<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

<sup>2</sup>GET, Toulouse

<sup>3</sup>ENSG, Nancy

<sup>4</sup>ISTeP, Paris

Having initiated in the eastern Pyrenees, orogenesis is believed to have migrated westward with time. However, the amount, timing and kinematics of deformation in the NE Pyrenees are poorly constrained. Orogenic history along a 60 km long N-S cross-section from Carcassonne to the axial zone is investigated by restoring the pre-orogenic crustal template and by constraining foreland basin deformation and subsidence.

In the foreland, sediments were deposited directly on Palaeozoic sediments (no Mesozoic extension). Depocentres and deformation migrated steadily northward from Cenomanian. Growth strata were deposited around basement-cored anticlines. Total N-S shortening north of the North Pyrenean Frontal Thrust (NPFT) was 3-4 km. Three phases of basin subsidence are identified. (1) From Turonian to Ypresian (Ilerdian)

very low subsidence accommodated deposition of <700m of continental to shallow marine clastics. (2) Ilerdian deepening briefly created an underfilled basin, followed by shallowing up (deltaic environment) in the Lutetian (total thickness <1 km). (3) Finally, continental-lacustrine facies supplied from the orogeny were deposited from Lutetian to Bartonian (<1 km). New (U-Th-Sm)/He zircon thermochronological data indicate that the Salvezines basement massif in the North Pyrenean Zone (NPZ) began actively exhuming at the end of the Cretaceous and continued to at least Lutetian.

The NPFT marks the inverted breakaway of Mesozoic rifting. Apto-Albian depocentres and their contacts show characteristics of salt controlled mini-basins, including welds along paleonormal faults. Alpine shortening of salt-based depocentres becomes more intense southward. Albo-Cenomanian albitisation in the Salvezines massif (400°C) and HT metamorphism of the Boucheville Apto-Albian basin (500-600°C; with peridotite enclave) were related to extreme thinning of the crust. Subsequently, high Pyrenean contraction is necessary to return crustal thickness to present day values of 40 km.

#### 4.2.42 (p) Pro- versus retro-foreland evolution : A case study of the Eastern Pyrenees

Arjan Grool<sup>1</sup>, Jaume Vergès<sup>2</sup>, Mary Ford<sup>1</sup>, Frédéric Christophoul<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

<sup>2</sup>Institut de ciències de la terra Jaume Almera, Barcelona, Espagne

<sup>3</sup>GET, Toulouse

In doubly-vergent orogens the asymmetry of plate underthrusting generates distinctly different characteristics in pro-foreland (on lower plate) and retro-foreland (on upper plate) wedges. Modelling studies show the pro-foreland basin preserves subsidence principally of younger orogenic phases, accelerating through time. In contrast, the retro-foreland basin preserves a complete history of the orogenic growth phase, but a condensed or no history of the steady-state phase. Here subsidence decreases through time.

This hypothesis has been previously investigated using boreholes scattered across an orogen, thus ignoring possible along-strike variations. Differences in timing or loading along strike can be minimised by comparing pro- and retro-foreland sections that lie directly opposite each other. The Eastern Pyrenees is a relatively well-studied doubly-vergent orogen where ages of sediment on both sides still overlap. We use subsurface, map, field and literature data to construct balanced & restored cross sections and perform subsidence analyses in the Lavelanet area of the French external Pyrenees and along the Cardener River in the southeastern Pyrenees. We compare timing & distribution of subsidence and sediment supply, and the amount & timing of shortening.

The eastern Ebro basin (pro-foreland) and eastern Aquitaine basin (retro-foreland) Paleogene and Cenomanian to Oligocene sediments (respectively) were deposited onto Variscan basement. Oppositely verging folds and thrusts deform the forelands. An Eocene evaporitic detachment in the Ebro basin is absent in the eastern Aquitaine basin where fault-propagation folds grew above basement-involving thrusts accommodating less shortening than in the Ebro basin. Migration of deformation was slow to non-existent, agreeing with the above hypothesis. We provide new insights and precision into the differences in evolution of pro- and retro-foreland basins in a doubly vergent orogen, using the Eastern Pyrenees as a case study.

#### 4.2.43 (p) Evolution tectono-sédimentaire du rétro-bassin d'avant pays aquitain le long du profil ECORS : réalisation d'une coupe équilibrée et études de la subsidence

Louis Hemmer<sup>1</sup>, Mary Ford<sup>1</sup>, Frédéric Christophoul<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

<sup>2</sup>GET, Toulouse

Les études sur l'évolution de la vitesse, de la distribution de subsidence et la géométrie des cortèges de dépôts dans les rétro-bassins d'avant pays sont moins documentés que dans les pro-bassins d'avant pays. Dans les pro-bassins d'avant pays, la subsidence commence tardivement, les dépôts-centres migrent rapidement et sont progressivement intégrés au prisme orogénique (bassins transportés). Par contre, les rétro-bassins d'avant pays enregistrent l'intégralité de l'histoire de l'orogénèse dans un unique foredeep migrant peu au cours du temps.

Dans le cadre du projet ANR PYRAMID, cette étude tente de vérifier ces hypothèses dans le rétro-bassin Aquitain à partir de l'évolution de la subsidence basée sur les données de puits et la construction d'une coupe équilibrée le long du profil ECORS, du sud au nord par Oust, Daumazan-sur-Arize, Muret et Lavaur. Ces données permettent de retracer l'histoire tectono-stratigraphique.

Les dépôts salifères sont absents au Nord du Chevauchement Frontal Nord Pyrénéen, le crétacé supérieur repose directement sur le socle. Les failles Hercyniennes ont certainement eu un rôle prépondérant dans l'évolution structurale du bassin Aquitain.

Une extension importante à l'Albo-Aptien permet la sédimentation d'une épaisseur de plusieurs kilomètres de flysch noir dans la zone Nord-Pyrénéenne. La compression pyrénéenne débute probablement dès le Santonien. Au Campano-Maastrichtien une subsidence rapide se concentre dans un bassin étroit d'axe ONO-ESE (la Zone Sous-Pyrénéenne) et permet l'accumulation d'une épaisseur de plus de 5 kilomètres de sédiments. Elle est contrôlée au sud par le CFNP.

Après une brève période de quiescence au cours du Paléocène, la subsidence reprend avec les dépôts marins Eocène et la formation continentale de Palassou. Les dépôts-centres éocènes migrent vers le nord de la ZSP et la plate-forme toulousaine. L'interprétation des coupes sismiques permet de mettre en évidence un onlap vers le nord de ces séries. Cette migration s'accompagne de l'émergence du bassin. Au Miocène, la subsidence diminue et les dépôts sont discordants sur les séries antérieures. Le rétro-bassin d'avant pays pyrénéen a donc subi une alternance de phases de subsidence statique mais également des phases de migration de dépôts-centres vers l'avant-pays.

#### 4.2.44 (p) Etudes sédimentologique et tectonique du Bassin Aquitain central : contraindre l'histoire de la subsidence et de la déformation d'un rétro-bassin d'avant-pays

Geraldine Rougier<sup>1</sup>, Mary Ford<sup>1</sup>, Anne-Gaëlle Bader<sup>2</sup>, Frédéric Christophoul<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

<sup>3</sup>GET, Toulouse

Le Bassin Aquitain constitue le bassin d'avant-pays du rétroprisme nord pyrénéen. Il fait partie des bassins les plus explorés. Néanmoins, la déformation et la stratigraphie des dépôts syn-orogéniques sont peu documentées. L'interprétation des données de subsurface (puits pétroliers et profils sismiques) permettent de reconstruire l'histoire sédimentaire pré-, syn- et post-orogénique. Nous présentons une nouvelle lithostratigraphie le long d'un transect NNE-SSO de 120 km, de Saint-Gaudens à Montauban. Depuis le Crétacé supérieur, les épaisseurs des séries et la migration des faciès sont contrôlées par les variations de subsidence liées à l'orogénèse pyrénéenne. La chronologie de la déformation alpine et sa distribution sont affinées.

Les dépôts anté-albiens de la ZNP très déformés pourraient être la signature d'une tectonique distensive anté-convergence. La déformation du

bassin liée à l'orogénèse est concentrée sur trente kilomètres et constitue les Petites Pyrénées. C'est un dépôt-centre où reposent plusieurs kilomètres de flyschs crétacés impliqués dans des plis de croissance pluri-kilométriques d'axe SE-NO. La déformation se propage vers le nord au cours du temps et s'est aussi traduite par une activité diapirique probablement initiée dès le Jurassique. Nous montrons le rôle des structures crustales héritées des phases extensives mésozoïques. Par exemple, le FPP, dont le jeu compressif s'échelonne du Crétacé supérieur à l'Oligocène, est scellé par les molasses miocènes. Le CFNP correspond à l'inversion de la bordure nord du bassin albo-cénomani qui contrôlait sa sédimentation. Les flyschs du Crétacé supérieur scellent son activité. La plate-forme au nord n'est pas déformée. Sa sédimentation migre vers l'avant-pays depuis l'Ilerdien et s'accompagne d'une nette diminution d'épaisseur des dépôts marins, devenant vers le nord détritiques et continentaux.

Ce projet est financé par le BRGM (RGF-Pyrénées).

#### 4.2.45 (p) Evolution du rétro-prisme Nord Pyrénéen : études tectonique et stratigraphique le long d'une coupe NNE-SSO (bassins de Comminges ouest - Mirande)

Larissa Ngombi Mavoungou<sup>1</sup>, Mary Ford<sup>1</sup>, Frédéric Christophoul<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

<sup>2</sup>GET, Toulouse

La convergence entre la plaque Ibérique et la plaque Européenne a engendré la formation de deux bassins flexuraux d'avant-pays : le bassin d'avant-pays de l'Ebre et le rétro-bassin d'avant-pays d'Aquitaine. Dans le cadre du projet ANR PYRAMID, une étude de la stratigraphie, de la structure et de la subsidence du bassin d'Aquitaine a été réalisée afin d'avoir une meilleure compréhension de l'évolution d'un rétro-prisme (chaîne plissée et bassin flexural). Ce travail a été réalisé le long d'un transect NNE-SSO de 129 km qui débute dans la Zone-Nord Pyrénéenne, traverse le plateau de Lannemezan et s'étend dans la plate-forme Aquitaine au niveau du Mole de Montauban. Cette étude intègre des données de puits disponibles qui ont permis l'élaboration de la chrono- et de la litho-stratigraphie utilisées pour construire l'histoire de subsidence. Une coupe structurale a été construite en intégrant les puits interprétés et les coupes sismiques jusqu'à la profondeur de 3 secondes. Les résultats obtenus montrent une variation d'épaisseur et une migration des sédiments du sud vers le nord. La bordure nord du dépo-centre apto-albien est inversée et génère le front chevauchant, scellé par les dépôts du Crétacé supérieur. Les évaporites du Keuper qui forment par moment des diapirs, constituent aussi un niveau de décollement. Les courbes de subsidence révèlent trois périodes d'accélération de la subsidence. Une première phase d'accélération apto-albienne correspond à la période d'extension majeure (flysch noir) et est suivie par un ralentissement au début du Crétacé supérieur. Une seconde période d'accélération au Campano-Maastrichtien est liée à la flexure de la lithosphère et au début de l'orogénèse pyrénéenne. Une phase de quiescence au Paléocène se fait suivre par une troisième phase d'augmentation du taux de subsidence à l'Eocène. Cette dernière serait le résultat de la généralisation du régime de compression.

#### 4.2.46 (p) The south-Pyrenean thrust sequence and thermal history in the eastern Jaca basin (W-central southern Pyrenees)

Pierre Labaume<sup>1</sup>, Antonio Teixell<sup>2</sup>, Florian Meresse<sup>3</sup>, Marc Jolivet<sup>4</sup>, Abdeltif Lahfid<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier

<sup>2</sup>Dpt. de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, Espagne

<sup>3</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>4</sup>Géosciences Rennes

<sup>5</sup>BRGM, Orléans

The Jaca basin is a thrust-sheet top basin transported southward and underlain by basement and cover thrusts separated by a Triassic décollement. Basin-fill upper Cretaceous to lower Oligocene synorogenic sequences record a southward depocenter migration, while growth strata date a shift of deformation from the mid-Eocene in the N to the early Miocene in the S (S-Pyrenean front). However, the deep geometry and kinematic relationships between the cover and basement thrusts remain non-consensual. We present a new structural and kinematic interpretation for the eastern Jaca basin, based on subsurface structural maps and cross-sections constructed using industrial seismic reflection profiles. Raman Spectroscopy of Carbonaceous Material (RSCM), vitrinite reflectance and apatite fission track (AFT) thermochronology data give further constraints for the restoration of the deformation and burial-exhumation sequence. We define 3 main basement thrusts under the northern part of the basin, from N to S the Broto, Fiscal and Guarga thrusts. The study also clarifies the deep structure of the cover thrusts and their links with these basement thrusts and those located more to the north in the Axial Zone (AZ), which altogether define the timing of the basement thrust sequence as follows : the Lakoura-Eaux Chaudes thrust system (northern AZ) active up to the end Bartonian, the Gavarrie (central AZ) and Broto thrusts during the Priabonian-Rupelian and the Fiscal and Guarga thrusts during the late Oligocene-early Miocene. AFT results in the basin fill and AZ date the exhumation of the basin to the late Oligocene-early Miocene, in relation to the Fiscal-Guarga thrusting. AFT partial reset argues for a maximum burial < 6 km for the base of the Eocene detrital sequence (Hecho Group turbidites). By contrast, RSCM and vitrinite thermometry at the same level indicates Tmax around 180°C, locally up to 240°C, attesting to a temperature anomaly possibly related to transient fluid circulation.

#### 4.2.47 (p) Fluid-deformation interactions during syn-sedimentary growth of fold : example from the Pico del Aguilla Anticline, Sierras Marginales, Southern Pyrenees, Spain.

Nicolas Beaudoin<sup>1</sup>, Damien Huyghe<sup>2,3</sup>, Nicolas Bellahsen<sup>4</sup>, Olivier Lacombe<sup>4</sup>, Laurent Emmanuel<sup>4</sup>, Frédéric Mouthereau<sup>4</sup>, Laure Ouanhnon<sup>4</sup>

<sup>1</sup>School of Geographical and Earth Sciences, Univ. Glasgow, Glasgow, Royaume-Uni  
<sup>2</sup>GET, Toulouse  
<sup>3</sup>LFC-R, Pau  
<sup>4</sup>ISTeP, Paris

This study presents a reconstruction of fold-fracture-fluid evolution in the Pico del Aguilla Anticline, located on the southwestern front of the Jaca piggy-back basin, South Pyrenees, Spain. The kinematic evolution of the Pico del Aguilla anticline is related to the successive propagation of N-S ramps and reactivation of E-W striking basement thrusts that occurred during sediments deposited. Consequently, this anticline offers an ideal frame to assess the evolution of the fluid system during the syn-sedimentary deformation at the front of a fold-thrust belt. 8 fracture sets (joints or faults) observed at fold-scale composes a fracture sequence defined using observed chronological relationships on field and considering the remarkable temporal frame granted by the syntectonic sediment deposits. This fracture sequence covers from Middle Eocene to Early Oligocene, and the progressive rotation of fracture sets from NE-SW to E-W witness the clockwise rotation that occurred during folding.  $\delta^{18}O$  and  $\delta^{13}C$  values for vein cements suggest a fluid

system buffered by host rocks in most of the case. The fluid inclusion microthermometry measurements indicate a fluid entrapment temperature <50°C, supporting that the fluid system reflect strata burial during the major part of strata history. Small-scale vertical migrations from reservoir to reservoir are triggered by fractures related to strata-curvature both during forebulge and fold development. Since folding, the marine regression affected fluid system, as fractures developing in shallow strata triggered downward migration of surficial fluids likely of meteoric origin. This phenomenon is poorly developed in Bartonian and Priabonian marine deposits but ends in governing the fluid system recorded in the continental deposits of the Late Priabonian/Stampian. The case study of the Pico del Aguilla supports recent finding that fold-fluid system seems to exhibit a common behavior during folding, with the development of curvature-related joints that triggered vertical migration of fluids from a reservoir to another. This study also illustrates that fluid system is govern by environmental conditions, and the study of the Priabonian/Stampian continental-related fluid system in the reservoir provides a consistent frame to refine the isotopic signature of meteoric fluids in the South-Pyrenean foreland.

#### 4.2.48 (p) Geometry at depth of the western part of the south pyrenean central unit constrained by 2.5D gravity modelling

Pablo Santolaria Otin<sup>1</sup>, Antonio Casas-Sainz<sup>1</sup>, Ruth Soto Marín<sup>2</sup>, Albert Casas-Ponsati<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Espagne

<sup>2</sup>Instituto Geológico y Minero de España, Zaragoza, Espagne

<sup>3</sup>Univ. of Barcelona. Dep. of Geochemistry, Petrology and Geological Prospection, Barcelona, Espagne

The western part of the South Pyrenean Central Unit (Southern Pyrenees) recorded a complex geological thin-skinned deformation during the Pyrenean orogeny in which salt tectonics played a major role. This deformation included the intrusion of diapirs, differential forelandwards thrust sheet displacement associated with vertical-axis rotations of structures, and complex thrust imbrication sequences and upward transfer of deformation from the basal Triassic décollement to the Eocene intermediate décollement towards the South. The syntectonic Eocene-Oligocene sediments preserved in this area permitted to unravel the kinematics of many structures, but unraveling their geometrical pattern at depth makes necessary the use of subsurface data and other indirect methods. In this work, gravity data are used to analyze the geometry of Triassic and Eocene evaporitic horizons and accumulations because of the strong density contrasts between evaporites (2.3 gr/cm<sup>3</sup>) and non-evaporitic units (2.48 to 2.67 gr/cm<sup>3</sup>). 2.5D gravity modeling allows defining the root of the different diapirs and its vertical development, the thickness of the accumulation of evaporitic units and other geological features.

5013 gravity stations covering (IGME database, Geological Survey of Spain and our own data) an area of 5000 km<sup>2</sup> were done to perform a 2.5D gravity modelling of the studied area. These data were used to constrain the geometry at depth of three cross-sections oriented NNE-SSW which cut the main evaporite-related structures. The residual gravity anomalies range between 8 and -20 mGals, being the relative gravity lows always related to evaporitic accumulations. In the Sierras Marginales thrust sheet, deep-rooted Triassic diapirs occur in its western part, whereas the Triassic accumulations are rooted at shallower levels towards the east. Finally, the Barbastro-Balaguer anticline, the southernmost Pyrenean structure, cored by Eocene evaporites, coincides with an elongated gravity low.

#### 4.2.49 (p) Detachment fold vs. ramp anticline : A gravity surveying in the pyrenean south-westernmost termination

Pablo Calvín-Ballester<sup>1</sup>, Pablo Santolaria Otin<sup>2</sup>, Antonio Casas-Sainz<sup>2</sup>, Emilio L. Pueyo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Paleomagnetismo, Universidad de Burgos, Espagne

<sup>2</sup>Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Espagne

<sup>3</sup>Instituto Geológico de España, Zaragoza, Espagne

Geological structures can be interpreted in different ways as a function of the available data, and several geometric interpretations may have an equal validity. That is the case of Santo Domingo Anticline, the westernmost structure of the External Sierras and the South Pyrenean sole thrust. The outcropping structure is well known from field data ; a WNW-ESE trending cylindrical anticline cored by Triassic evaporites with subvertical and parallel limbs that deforms a Triassic-Miocene sequence. The absence of seismic data hinders a unique interpretation of the underground geometry and controversy exists : a ramp anticline or a detachment fold. The geometry of the structure has important consequences regarding the accommodated shortening and the amount of accumulated Triassic evaporites in the core of the structure. In this work, combination of cross-sections and gravity data are used to analyze the structure in depth. Gravity survey and 2.5D gravity modelling allows defining the geometry of the evaporitic core because of the strong density contrast between Triassic evaporites (2.31 gr/cm<sup>3</sup>) and surrounding rocks (2.45-2.6 gr/cm<sup>3</sup>). A total of 250 gravity stations are considered. The results obtained indicate a clearly defined WNW-ESE elongated negative anomaly. The magnitude of the anomaly reaches 5 mGal in its central part, gradually diminishing towards its lateral margins. It shows an asymmetric shape, dipping more steeply towards the South and shallower towards the North. The limits of the anomaly roughly coincide with the core of the Santo Domingo anticline. The shape of the residual gravimetric anomaly, its asymmetry, and the densities of materials in the stratigraphic sequence allow to constrain the geometry of the causative body. 2.5D modelling indicate that the anomaly is consistent with an asymmetric triangular shape for the Triassic, with a horizontal base, accordingly with a detachment fold geometry explaining the origin of the Santo Domingo anticline.

#### 4.2.50 (p) Séquences de dépôts ante, syn et post-tectoniques dans la zone occidentale de l'Unité Sud Pyrénéenne Centrale

Andrea Barrier<sup>1</sup>, Quentin Regnault<sup>1</sup>, Philippe Ott D'Estevou<sup>1</sup>, Benoit Proudhon<sup>1</sup>, Yannick Vautier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais

L'Unité Sud Pyrénéenne Centrale (USPC) est formée de l'empilement de trois nappes principales, à vergence sud, dans un dispositif en « piggy-back ». A l'Est, leur rampe latérale est commune, matérialisée par le décrochement sénestre du Segre. A l'Ouest, chaque nappe a sa rampe propre matérialisée par de puissants anticlinaux subméridiens. Ces associations structurales sont, de la plus ancienne à la plus récente : Boixols-Turbon, Montsech-Mediano, Sierras Marginales-Boltaña. Dans cette optique, il semble que la Peña Montañesa et Añisclo représentent un élément secondaire. Les mises en place se sont effectuées de manière diachrone d'Est en Ouest entre le Crétacé supérieur et l'Oligocène. A chacune de ces structurations sont associées des aires de sédimentation, respectivement Tierrantona, Ainsa et Jaca. Une étude de terrain, appuyée sur une cartographie détaillée, montre l'existence de discordances

et de séquences de dépôts, ante, syn et post tectoniques très caractéristiques et répétitives, indépendamment de leur âge. Avant les structurations se produit une sédimentation de plateforme carbonatée. Puis, les surrections se traduisent par des déstabilisations à faciès noduleux de brèches intraformationnelles, suivies de débâcles tectono-sédimentaires (slumps, olistolithes, tronçatures, fracturations...). En continuité se déposent des séries flyschoides (depuis des séries de turbidites franches jusqu'à des molasses continentales). Enfin, le scellement des structures est assuré soit par un retour à des dépôts carbonatés (marnes et/ou ré-cifs), soit par le débordement des flyschs issus de la structure adjacente. A partir de ces séquences types limitées par des discordances ce travail propose des corrélations à l'échelle de la zone Ouest de l'USPC ainsi qu'une cartographie des dépôts et des événements tectono-sédimentaires.

#### 4.2.51 (p) Burial diagenesis of the Eocene Sobrarbe delta (Ainsa basin, Spain) inferred from dolomitic concretions

Guilhem Hoareau<sup>1</sup>, Francis Odonne<sup>2</sup>, Daniel Garcia<sup>3</sup>, Elie-Jean Debroas<sup>2</sup>, Christophe Monnin<sup>2</sup>, Michel Dubois<sup>4</sup>, Jean-Luc Potdevin<sup>5</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau

<sup>2</sup>GET, Toulouse

<sup>3</sup>Département GéoSciences et Environnement, École Nationale Supérieure des Mines, Saint-Étienne

<sup>4</sup>LGCgE, Lille

<sup>5</sup>Géosystèmes, Lille

The petrographic, geochemical, isotopic and microthermometric study of several fractured dolomite concretions and enclosing prodelta marls were used to determine the evolution of burial diagenesis in the Eocene Sobrarbe delta (Ainsa basin, Spain), deposited during the tectonic evolution of the South Pyrenean Foreland Basin (SPFB). The paleohydrology of the area is shown to involve marine and meteoric-derived waters and to reflect the progressive establishment of continental conditions in the area, controlled by compressive tectonics.

Shallow burial diagenesis was controlled by microbial activity in marine-derived porewaters. Microbial sulphate reduction and methanogenesis were responsible for the formation of pyrite / early calcite, and the growth of dolomite concretions, respectively. Subsequent diagenesis involved the precipitation of tabular barite and minor celestite in bioturbation traces, interpreted to have formed early in marine-derived porewaters. It was followed by the precipitation of Fe-rich calcite and cm-sized celestite in septarian fractures of the concretions. Stable isotopes indicate that calcite probably formed in meteoric-derived waters coming from the overlying fluvial delta plain. Celestite may have precipitated in waters of mixed parentage, but the exact origin of dissolved sulphate remains poorly constrained. In tectonic shear fractures, celestite precipitated coevally with calcite displaying evidence of strong fluid-rock interaction. Dissolved sulphate may have migrated to the fractures during active tectonics (Upper Eocene to Oligocene).

The parageneses and the proposed paleohydrologic model are close to those previously described for deltaic facies of the eastern SPFB. These features point to a common diagenetic process in syntectonic deltaic domains of the SPFB, involving meteoric and marine fluid sources, and the widespread precipitation of sulphate minerals close to decollement-related or depositional evaporites.

#### 4.2.52 (p) Multi-episodic remagnetization related to deformation in the Pyrenean Internal Sierras

Esther Izquierdo Llavall<sup>1</sup>, Antonio Casas-Sainz<sup>1</sup>, Belen Oliva-Urcia<sup>2</sup>, Russell Burmester<sup>3</sup>, Emilio L. Pueyo<sup>4</sup>, Bernard Housen<sup>3</sup>

- <sup>1</sup>Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Espagne  
<sup>2</sup>Departamento de Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, Espagne  
<sup>3</sup>Department of Geology, Western Washington University, Bellingham, États-Unis  
<sup>4</sup>Instituto Geológico de España, Zaragoza, Espagne

The Internal Sierras (IS) define a conspicuous mountain range linked to the forelimb of the hangingwall anticline of the Gavarnie thrust, in the southern margin of the Western-Central Axial Zone (Southern Pyrenees). The IS show a change of structural trend, from  $\sim$  N120-130°E in the western and eastern sectors to  $\sim$  N070-090°E in their central part. Paleomagnetic techniques were used in this area with the target of defining if this structural feature is either secondary (i.e., induced by deformation and vertical axis rotations during the Pyrenean compression) or, conversely, the result of a primary orientation controlled by structures inherited from pre-orogenic times.

From 23 new paleomagnetic sites, two meaningful paleomagnetic components were resolved, mainly carried by magnetite : (1) a lower-temperature component (B) that unblocks between 200°C and 325-400°C and (2) a higher-temperature component (C) that has been successfully isolated by means of combined thermal (up to 400°C) and AF demagnetization (generally up to 50-100 mT). The B component is post-folding and generally postdates emplacement of basement thrust sheets. It supports small but statistically significant clockwise rotations in the western part of the IS (from +18 to +26°) that can be attributed to the westwards shortening decrease of basement thrusts below the Gavarnie unit. The C component has been interpreted as an early remagnetization, based on the results of conglomerate and fold tests. This component pre-dates basement thrusting and is diachronous across the study area. New and previous paleomagnetic data point out that curvature in the IS is probably a primary feature and the along-strike change in their trend could be interpreted as the result of basement geometrical features inherited from Variscan, Late Variscan or Mesozoic times. A complex and multi-episodic remagnetization probably related to burial and deformation processes occurred during Eocene times.

#### 4.2.53 (p) Overview of Anisotropy of Magnetic Susceptibility fabrics in Alpine cover rocks from the Southern Central Pyrenees

Andrés Pocoví Juan<sup>1</sup>, Oscar Pueyo Anchuela<sup>1</sup>, Emilio L. Pueyo<sup>2</sup>, Antonio Casas-Sainz<sup>1</sup>, Teresa Román-Berdiel<sup>1</sup>, Andrés Gil Imaz<sup>1</sup>, Javier Ramajo Cordero<sup>1</sup>, Tania Mochales<sup>3</sup>, Cristina García-Lasanta<sup>1</sup>, Esther Izquierdo Llavall<sup>1</sup>, Josep Pares<sup>4</sup>, Elisa Sánchez<sup>5</sup>, Ruth Soto Marín<sup>2</sup>, Carlota Oliván<sup>2</sup>, Adriana Rodríguez Pintó<sup>1</sup>, Belén Oliva-Urcia<sup>6</sup>, Juan Villalafán<sup>5</sup>, Pablo Santolaria Otín<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Espagne

<sup>2</sup>Instituto Geológico de España, Zaragoza, Espagne

<sup>3</sup>Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, L'Aquila, Italie

<sup>4</sup>Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana, Burgos, Espagne

<sup>5</sup>Universidad de Burgos, Campus Río Vena, Burgos, Espagne

<sup>6</sup>Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, Espagne

Anisotropy of Magnetic susceptibility (AMS) has been traditionally used as an indirect approach for the characterization of mineral preferred orientation and rock petrofabric. In the Southern Central Pyrenees, a robust data set of magnetic fabrics covering a wide range of ages, structural context, and lithologies has been used for an assessment at the orogen scale, of the sensibility of AMS as a record of strain. AMS results reveal : (i) a dominant bedding-controlled foliation, very sensitive to subtle layer parallel shortening (LPS), especially in the Southern foreland basin ; (ii) magnetic lineations parallel to fold axes or strike of

thrusts outside the cleavage front that can be deflected by vertical-axis rotations in particular areas ; and (iii) an overall decrease of either magnetic lineation or the anisotropy of the magnetic ellipsoid associated with incipient cleavage and intersection lineation fabrics in the internal zones of the orogen.

These results show a magnetic foliation that is strongly controlled by the bedding/lamination arrangement, and a magnetic lineation with an overall distribution parallel to the Pyrenean orogen but more sensitive to record local deformational processes. These results suggest a strong stability of bedding-related magnetic fabrics, and that only intense deformation processes and development of compression-related cleavage can modify the primary, sedimentary fabric. The distribution of AMS both at regional and local scale evidences that the anisotropy degree of the magnetic ellipsoid is more sensitive than the orientation of the principal susceptibility axes to strain changes. The presented dataset highlights the requirement of evaluating factors such as mineralogy, age deposit, and pressure-temperature conditions during deformation in order to accurately reconstruct the Pyrenean strain history from the AMS results.

#### 4.2.54 (p) Late compressional deformation in the Ebro foreland basin (N Spain) ; insights from magnetic fabrics

Ruth Soto Marín<sup>1</sup>, Juan J. Larrasoaña<sup>1</sup>, Elisabet Beamud<sup>2</sup>, Miguel Garcés<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Geológico y Minero de España, Zaragoza, Espagne

<sup>2</sup>Unitat de PALEOMAGNETISME, Institut de Ciències de la Terra « Jaume Almera », Barcelona, Espagne

<sup>3</sup>Universitat de Barcelona, Facultat de Geologia, Barcelona, Espagne

The Ebro basin constitutes the foreland basin of three Alpine ranges : the Pyrenees, the Iberian Chain and the Catalan Coastal Ranges. Its formation started during the Paleocene by flexural subsidence related to the growth of these ranges, and a continuous sequence of latest Eocene, Oligocene and Miocene continental sediments filled it. The latest tectonic pulse in the Pyrenees has been dated as Late Oligocene-Early Miocene at its southernmost compressive structure, whereas the youngest structures in the Iberian Chain affected Mid-Miocene rocks in age. This work aims to analyse this transfer of deformation through time in sediments apparently undeformed from the Ebro foreland basin. Results of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) analyses of 19 sites located at its central part and carried out on Lower to Middle Miocene (20.4 to 13.7 Ma) mudstones reveal the presence of a subtle tectonic overprint lasting at least until the Serravallian (Middle Miocene). Data show a magnetic lineation varying from E-W to NE-SW through time. Additionally, a slight variation of magnetic parameters  $K_m$ ,  $P_j$  and  $T$  exists through time probably due to changes in sedimentation conditions.

#### 4.2.55 (p) La Zone Interne Métamorphique des Pyrénées : une unité allochtone ?

Maxime Ducoux<sup>1</sup>, Charles Gumiaux<sup>1</sup>, Thierry Baudin<sup>2</sup>, Laurent Jolivet<sup>1</sup>, Florence Cagnard<sup>2</sup>, Abdeltif Lahfid<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

Les structures compressives développées dans les Pyrénées lors de la collision Ibérie-Eurasie sont fortement contrôlées, en localisation et/ou en direction par les structures géologiques héritées dans la croûte continentale. Cet héritage structural date de l'orogène Varisque, dans un premier temps, puis du développement d'une extension continentale au

Crétacé. Les empreintes de cette extension sont particulièrement développées dans la Zone Nord Pyrénéenne (ZNP) où sont reconnues les traces des bassins extensifs. Ce domaine relativement étroit marque aussi une localisation forte du raccourcissement lors de la phase de collision. Il est jalonné au sud et le long de la Faille Nord Pyrénéenne par la Zone Interne Métamorphique (ZIM) qui affiche une structure et des lithologies très particulières (marbres, foliés et parfois bréchifiés, péridotites...) sur une bande d'une largeur limitée à quelques kilomètres, depuis le massif de l'Agly, à l'est, jusque dans les massifs Basques Espagnols où elle forme la nappe des Marbres. Les marbres résultent de la transformation métamorphique de la série carbonatée des bassins vraisemblablement d'âge Jurassique à Crétacé Inférieur. Le métamorphisme HT-BP a atteint des températures de 550 à 600°C dans la ZIM et la Nappe des Marbres. Cependant, les formations environnantes, représentées par le socle Paléozoïque ou des séries d'âge mésozoïque ne sont pas exemptes de métamorphisme, avec des températures maximales mesurées pouvant atteindre 350°C. Les contrastes thermiques mesurés au sein de la ZNP ainsi que les contrastes d'intensité de la déformation impliquent des rapprochements tardifs entre les domaines très métamorphiques et ceux peu-métamorphiques, et les structures observées sur le terrain suggèrent l'allochtonie des premières. Nous présentons une nouvelle interprétation de la géométrie 3D de la ZNP suivant cette hypothèse.

#### 4.2.56 (p) Champ de déformation actuelle des Pyrénées caractérisé par les mesures GPS et les mécanismes au foyer

Alexis Rigo<sup>1</sup>, Philippe Vernant<sup>2</sup>, Kurt Feigl<sup>3</sup>, Xavier Goula<sup>4</sup>, Gorgi Khazaradze<sup>5</sup>, Laurent Morel<sup>6</sup>, Stéphane Baize<sup>7</sup>, Joelle Nicolas<sup>6</sup>, Jean Chéry<sup>2</sup>, Matthieu Sylvander<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IRAP, Toulouse

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier

<sup>3</sup>Université du Wisconsin, Madison, États-Unis

<sup>4</sup>ICGC, Barcelone, Espagne

<sup>5</sup>Université de Barcelone, Espagne

<sup>6</sup>L2G, École Supérieure des Géomètres et Topographes, Le Mans

<sup>7</sup>IRSN, CEA, Fontenay-aux-Roses

Les Pyrénées sont une chaîne de montagne à déformation lente avec une activité sismique continue et modérée. Afin de quantifier la déformation horizontale actuelle, nous présentons un champ de vitesses estimé à partir de mesures GPS couvrant une période de 18 ans. Le réseau PotSis installé en 1992, et le réseau ResPyr installé en deux phases en 1995 et 1997, totalisent 85 sites GPS. Ces deux réseaux ont été remesurés lors de deux campagnes successives en 2008 et 2010. Le champ de déformation couvrant l'ensemble des Pyrénées indique des vitesses horizontales inférieures à 1 mm/a. À l'aide de profils, nous estimons un taux de déformation horizontal maximal NS en extension de 2 nanostrain par an dans la partie occidentale de la chaîne. Nous n'avons pas interprété les déplacements verticaux en raison de leurs trop grandes incertitudes. Afin de comparer le taux de déformation obtenu avec l'activité sismique, nous analysons un ensemble de 194 mécanismes au foyer à l'aide de trois méthodes : (i) le facteur « r » liée au plongement des axes P et T, (ii) les tenseurs de contrainte obtenus par inversion et (iii) le calcul des tenseurs de déformation. Les tenseurs de contrainte et les tenseurs de déformation sont déterminés : (i) sur l'ensemble de la chaîne pyrénéenne, (ii) sur les parties orientale et occidentale séparément, et (iii) sur huit zones définies à partir de leurs caractéristiques sismotectoniques et de la sismicité. Chacune de ces analyses révèle une variation latérale du style de déformation dans les Pyrénées avec de la compression et de l'extension à l'est, du décrochement au centre-ouest et à nouveau de l'extension à l'extrême ouest de la chaîne. Les composantes horizontales des tenseurs

de déformation estimées à partir des données sismiques sont plus petites en amplitude d'un facteur 10 par rapport à celles obtenues à partir du champ de vitesses GPS. Néanmoins, les deux ensembles de données sont cohérents entre eux et sont compatibles avec ce que l'on connaît des failles actives cartographiées.

#### 4.2.57 (p) L'origine des surfaces à faible relief et haute altitude dans les Pyrénées ; implications sur l'évolution post-orogénique de la chaîne

Gemma V. Bosch<sup>1,2</sup>, Jean Van Den Driessche<sup>1</sup>, Julien Babault<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

<sup>3</sup>Universitat Autònoma de Barcelona, Espagne

La morphologie de la zone axiale des Pyrénées se caractérise par la présence de surfaces d'érosion à faible relief et haute altitude. Celles-ci recoupent les structures tectoniques pyrénéennes. Elles sont remaniées à divers degrés par les glaciers du Quaternaire et incisées par le réseau de drainage actuel. Ces surfaces sont localement recouvertes par des dépôts du Miocène moyen, fixant un âge limite supérieur pour leur développement. Actuellement, deux hypothèses s'opposent quant à leur origine et l'implication de celle-ci sur l'évolution des mouvements verticaux post-orogéniques de la chaîne : (1) Elles résultent de la pénélplanation de la chaîne abaissant son altitude maximale à 1000m. Suivant cette hypothèse, un amincissement extrême du manteau lithosphérique de cette pénéplaine aurait permis à la chaîne d'atteindre son altitude actuelle à partir du Pliocène. (2) Elles correspondent à un aplanissement des reliefs en altitude ; l'aggradation des produits d'érosion sur le piedmont entraîne une remontée du niveau de base efficace de la chaîne. Cette remontée se traduit par l'inhibition de l'érosion et l'aplanissement des reliefs en amont. La première hypothèse élaborée à partir d'observations dans les Pyrénées Orientales est contradictoire avec la présence de surfaces dans les Pyrénées Centrales qui ont conservé une racine crustale épaisse. Nous présentons une nouvelle cartographie de ces surfaces à partir de levés de terrain et d'analyses de MNT. Nous montrons que leurs altitudes sont cohérentes avec la profondeur du Moho, confirmant que le développement de ces surfaces s'est effectué à haute altitude et infirmant l'hypothèse d'une surrection de 2000m de la chaîne au Plio-Quaternaire.

#### 4.2.58 (p) Evolution post-orogénique du piémont Nord-Pyrénéen

Frédéric Christophoul<sup>1</sup>, Stéphane Bonnet<sup>1</sup>, Sébastien Carretier<sup>1</sup>, Vincent Regard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

Les séries syn-foreland du bassin d'avant-pays Nord-Pyrénéen, entre le Crétacé supérieur et l'Oligocène sont connues. Les données de thermochronologie basse température montre que les derniers chevauchements accommodant la convergence Ibérie-Eurasie se sont mis en place à la fin de l'Oligocène. On peut donc considérer que depuis le Miocène la sédimentation alluviale dans le bassin Aquitain constitue un piémont post-foreland. La synthèse des données cartographiques, bibliographiques ainsi que la mise en cohérence des données de surface et de subsurface permet d'en préciser l'architecture stratigraphique : le piémont post-foreland des Pyrénées est constitué : 1- Des molasses miocènes. Elles sont plus grossières au sud et leur granulométrie diminue progressivement vers le nord. Ces sédiments grossiers sont issus de l'érosion des Pyrénées cependant vers le nord, dans l'Armagnac, les molasses miocènes font apparaître de nombreuses intercalations calcaires

(palustres et lacustres). Au Langhien et au Serravallien une transgression marine en provenance de l'Atlantique vient former un golfe dont la forme « moule » la morphologie du piémont pyrénéen correspondant aux dépôts molassiques. 2- Pliocène. Il est limité au piémont pyrénéen, il correspond à la Fm de Lannemezan. Ces dépôts correspondent à un cône alluvial issu de la vallée de la Neste. Vers l'est, à la confluence de la Garonne et du Salat, des dépôts contemporains sont connus, non pas recouvrant les dépôts miocènes mais comblant une vallée incisée, montrant que l'encaissement des vallées pyrénéennes était déjà en partie acquis au pliocène. Les données de sismique montrent que le piémont a progressivement rétrogradé sur les reliefs sous-pyrénéens entre le Miocène et le Pliocène. 3- Au quaternaire, le piémont agrandit subit une incision généralisée marquée par des réseaux de terrasses. La modélisation numérique d'un piémont similaire à celui des Pyrénées montre l'influence des forçages externes pour générer une telle incision.

#### 4.2.59 (o) Recent seismic sequences in the Central Pyrenees : similarities, differences, and inferences on the local stress regime

Matthieu Sylvander<sup>1</sup>, Sébastien Chevrot<sup>1</sup>, Sébastien Benahmed<sup>1</sup>,  
 Frank Grimaud<sup>2</sup>, Marie Calvet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IRAP, Toulouse

<sup>2</sup>IRAP, Tarbes

Although moderate according to global standards, the seismic activity in the north-central part of the Pyrenees is significant, and much more intense than in the rest of the range. Indeed, the small Bigorre region has experienced 60 % of the magnitude 4 and higher earthquakes of the Pyrenees in the last few years (9 out of 15 since 2006, EMSC magnitudes). In this part of the range, the seismicity is organized in clusters distributed along the North Pyrenean Fault (NPF), which is thought to delimitate the boundary between the Eurasian and African plates. We will focus on five seismic sequences between 2006 and 2014 which have been well recorded by dense permanent monitoring networks and by temporary deployments. They belong to two different clusters of seismicity, west and east of the Argelès-Gazost valley, and are characterized by different temporal behaviors : three of them consist of a mainshock followed by aftershocks, the two others do not include any clear mainshock, and could be labelled as short-lasting swarms. A fine mapping of the event distribution reveals distinct active sub-structures, which is of great importance for risk mitigation. Finally, these sequences show a striking similarity of their focal mechanisms, all consistent with approximately N-S extension, with an average N120 striking nodal plane, in agreement with recent focal works based on smaller data sets. Together with the absence of observable present-day large-scale horizontal deformation in the Pyrenees, this extensional regime supports the growing evidence of predominantly vertical movements in this region. The mechanism that drives this vertical movement remains elusive, but gravitational collapse or erosion seem incompatible with the geological records.

#### 4.2.60 (p) Spatial variations of seismic attenuation and heterogeneity in the Pyrenean crust

Marie Calvet<sup>1</sup>, Matthieu Sylvander<sup>1</sup>, Ludovic Margerin<sup>1</sup>, Antonio Villaseñor<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IRAP, Toulouse

<sup>2</sup>Institute of Earth Sciences Jaume Almeria, Barcelona, Espagne

As a complement to seismic velocity, attenuation may provide valuable information about the structure of Earth's crust. Two mechanisms of

attenuation can be invoked : (1) absorption which mainly depends on temperature, melt or fluid content, and chemical composition, (2) scattering due to small-scale velocity and density fluctuations. In this study, we explore lateral variations of seismic attenuation in the Pyrenees from the analysis of local earthquake records (~10000 waveforms). The role of intrinsic and scattering attenuation is analyzed in two steps. (1) The coda quality factor  $Q_c$ , which quantifies the energy decay of coda waves, is estimated at large lapse time in five frequency bands and interpreted as intrinsic absorption. (2) In the same five frequency bands, the peak delay time (Tpd) defined as the time lag from the direct S-wave onset to the maximum amplitude arrival is subsequently measured. Tpd quantifies the strength of scattering due to random inhomogeneities along the seismic ray path. Comparison of  $Q_c$  and Tpd measurements allows a qualitative interpretation of the origin of seismic attenuation (scattering/absorption) in the Pyrenean crust.

In the Pyrenees, the spatial variations of  $Q_c$  are complex and frequency-dependent. The peak delay time appears much less frequency-dependent and reveals a highly-scattering zone in the Western Pyrenees, which geographically coincides with a large, positive gravity anomaly and fast crustal velocities. The high level of heterogeneity and absorption in the Labourd-Mauléon area may be related to intrusions of mantle and/or lower-crustal materials. In the Eastern Pyrenees, at the location of Neogene structures, we observe a low(high)- $Q_c$  and -Tpd anomaly at high (low)-frequency, respectively. We hypothesize that the frequency-dependent attenuation pattern observed in this area is related to volcanic structures. In the central Pyrenees, the gravity anomaly of Saint-Gaudens is also characterized by a low absorption anomaly.

#### 4.2.61 (p) Aperçu de la structure profonde des Pyrénées par inversion conjointe de données gravimétriques et sismologiques

Grégory Dufrechou<sup>1</sup>, Christel Tiberi<sup>2</sup>, Sébastien Chevrot<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Géosciences Montpellier

<sup>3</sup>IRAP, Toulouse

Les Pyrénées correspondent à un orogène continental tertiaire résultant d'une évolution géodynamique complexe acquise lors de deux principaux cycles : (i) un cycle Varisque et (ii) un cycle alpin. S'il existe un certain consensus sur la nature et la géométrie des principales structures compressives en surface, la structuration profonde des Pyrénées, elle, reste depuis longtemps le sujet de nombreuses controverses.

Un effort géophysique considérable a été consenti au cours des dernières années sur cet orogène. Des réseaux denses de stations sismologiques ont ainsi été déployés en France dans le cadre du projet ANR PYROPE (2010-2013) et en Espagne dans le cadre du projet TOPO IBERIA. Le projet PYROPE a également permis de réaliser de nouvelles mesures gravimétriques dans la partie centrale et dans l'est de la chaîne Pyrénéenne.

L'association de ces nouvelles données gravimétriques avec les données sismologiques récemment acquises lors des campagnes de PYROPE nous permet d'envisager une nouvelle image des structures lithosphériques et mantelliques sous les Pyrénées. Cette étude propose donc d'inverser simultanément les données gravimétriques et sismologiques disponibles dans la zone pyrénéenne pour en ressortir des modèles complémentaires de densité et de vitesse. L'inversion conjointe est basée sur une approche bayésienne requérant un modèle 3D a priori de vitesse et de densité. Elle utilise une relation linéaire de type Birch (1961) entre vitesse des ondes P ( $V_p$ ) et densité ( $\rho$ ) du milieu,  $\Delta V_p = B \cdot \Delta \rho$ . Le coefficient B liant vitesse et densité peut également être inversé au cours du processus, permettant une plus grande liberté dans le choix de cette loi linéaire. Plusieurs modèles seront réalisés jusqu'à 400 km de profondeur, afin de tester différentes paramétrisations et facteurs d'inver-

sion (lissage, amortissement, grille adaptatives) et permettront de mieux contraindre son évolution géodynamique.

#### 4.2.62 (p) Topographic influence of the Pyrenean topography on isotope ( $\delta^{18}\text{O}$ & $\delta\text{D}$ ) in precipitation and rivers. Implications for paleotopographic reconstructions

Damien Huyghe<sup>1,2</sup>, Frédéric Mouthereau<sup>3</sup>, Loïc Segalen<sup>3</sup>, Mathieu Sebilo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>LFC-R, Pau

<sup>3</sup>ISTeP, Paris

<sup>4</sup>Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris

Documenting Earth surface past elevation is critical to understand the dynamics of collisional domains and to investigate tectonics vs. climate interactions and their relative influence on erosion and sedimentation. Topography exerts a direct control on precipitation and it is possible to determine the paleoelevation of a mountain range from analyses of minerals created from paleorainfall, because the isotopic composition of rain ( $\delta^{18}\text{O}$  &  $\delta\text{D}$ ) decreases with elevation.

Topography modifies the patterns of atmospheric circulation and thus the local isotopic lapse rate and the resulting isotope-in-precipitation patterns at high elevation. Thus, before reconstructing paleoelevation, the local modern isotope lapse rate has to be documented to quantify the amount of orographic effect on precipitation and get a first-order understanding of the interactions of topography and rainfall in the study area.

Here, we characterize the modern isotope lapse rate in the Pyrenees, a well-know collisional orogen, which is a privileged area for paleotopographic investigations. It presents the advantage to be a small orogen, which allows for a reliable and large sampling over a whole orogen. We sampled streams and creeks from small catchments that integrate near-surface runoff (i.e., precipitation) over months to years and hence provide a time-averaged signal of elevation. We collected 100 samples in 9 different valleys from N and S Pyrenees during the dry season (August and July), because it is the period during which groundwater, which is comprised by a mixture of rainfall of the annual cycle, dominates the stream water budget. Results reveal a good correlation of  $\delta^{18}\text{O}$  vs.  $\delta\text{D}$  values and mean  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  altitudinal gradients of  $-3.6\text{‰}$  and  $-29\text{‰}/\text{km}$  respectively. Distinct areas can be distinguished over the range according to their isotopic features. In particular, the southern Pyrenees exhibit lowers ratios than the north, suggesting an orographic effect of the range on the precipitations.

## Thème 5

# Paléoenvironnements et paléoclimats - *Paleoenvironments and paleoclimates*

Animateurs : Guilhem Hoareau (LFC-R, Pau), Guillaume Dera (GET, Toulouse)

### 5.1 Paléobiosphère : évolution et facteurs de contrôle

(Paleobiosphere : evolution and monitoring factors)

#### Responsables :

- Guillaume Dera (GET, Toulouse)  
guillaume.dera@get.obs-mip.fr
- Arnaud Brayard (Biogéosciences, Dijon)  
arnaud.brayard@u-bourgogne.fr

#### Résumé :

Cette session sera consacrée à la dynamique de la biodiversité et à son intégration dans un contexte global de modification des écosystèmes au cours des temps géologiques. Combinant des aspects naturalistes ou plus analytiques, celle-ci abordera des interrogations relatives aux grandes étapes de la vie sur Terre, aux reconstructions des écosystèmes anciens, et aux modalités évolutives des faunes et flores dans le temps et dans l'espace. Au regard des grandes questions sur le déclin de notre biodiversité actuelle, un accent particulier sera mis sur l'étude des extinctions passées, les rediversifications post-crisis, et leurs facteurs de contrôle. Cette session encourage donc une certaine forme de multidisciplinarité faisant le lien entre des approches purement paléontologiques (regroupant des aspects taxonomiques, paléobiologiques, morphologiques, phylogénétiques, ou paléobiogéographiques) et des considérations paléoclimatiques, géodynamiques, paléoenvironnementales ou géochimiques.

#### Mots clés :

Paléobiodiversité, évolution, extinctions, diversifications, paléoécologie, paléobiologie, paléoécosystèmes.

### 5.1.1 (o) Givetian and Frasnian of the eastern Pyrenees and the Mouthoumet Massif : how deep was it there ?

Markus Aretz<sup>1</sup>, Mathieu Rudmann<sup>1</sup>, Elise Nardin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

The palaeogeographical model for the Eifelian to Frasnian basin of southern France is relatively simple. Western and central parts of the Pyrenees represent shallow marine, mainly detritic facies, whereas the deeper basin is progressively found towards the northeast, towards the eastern Pyrenees, Mouthoumet Massif and Montagne Noire, where carbonate facies dominates. Surprisingly little is known about the palaeoenvironmental setting of these carbonates, often acknowledged as being deep, and also their possible spatial environmental and lithological variations.

Herein we present preliminary results of facies analyses of outcrops in different structural units in the eastern Pyrenees and the Mouthoumet Massif. Limited biostratigraphic correlations between the different units hampers detailed reconstructions, but some general points can be figured out.

There are important variations in lithology and thickness between and sometimes within the structural units. Micritic limestone facies dominates the successions, but grainy facies is locally surprisingly common for a succession considered deeper water. The limestones contain an argillaceous fraction, and fine-grained detritic rocks can be intercalated. Sedimentary structures as lamination or grading are not found. The presence of limestones rich in stromatolite cavities is a result of digenesis, and does not correspond to mud mounds. Most successions are very poor in macrofossils below the cephalopod limestones of the Griotte facies. There is a single locality, which contains horizons enriched in reefal organisms (stromatopora, tabulates and colonial rugose corals). This more shallower facies is more abundant in the lower part of the studied interval, but its spatial distribution is still unclear. It advocates for the presence of isolated shallow water realms (on structural highs ?) surrounded by deeper water, possibly drowned in the upper Devonian transgression, which levels out most facies differences.

### 5.1.2 (o) Datation LA-ICP-MS U-Pb sur zircon de la faune Triasique du Bassin de Luang Prabang (Laos) : implications biostratigraphiques, paléobiogéographiques et paléocéologiques

Camille Rossignol<sup>1</sup>, Sylvie Bourquin<sup>1</sup>, Marc Poujol<sup>1</sup>, Nour-Eddine Jalil<sup>2,3</sup>, Jean-Sébastien Steyer<sup>2</sup>, Bernard Battail<sup>2</sup>, Erwan Hallot<sup>1</sup>, Marie-Pierre Dabard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

<sup>2</sup>MNHN, Paris

<sup>3</sup>Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc

Le bassin de Luang Prabang (Laos) contient un registre fossile diversifié, composé, entre-autre, de dicynodontes et d'amphibiens chronisuchien. Des datations U-Pb sur zircons par LA-ICP-MS (laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry) ont été réalisées sur des échantillons prélevés dans la gangue de ces fossiles. Ces datations ont permis d'attribuer au Trias inférieur les Dicynodon sensu lato et le chronisuchien. Un dicynodonte kannemeyeriiforme attribué au genre Angoniasaurus a quant à lui été daté du Trias supérieur (Norien).

Ces résultats étendent de 20 Ma la répartition stratigraphique du genre

Angoniasaurus, connu jusque alors uniquement au Trias moyen (Anisien), invalidant l'utilisation potentielle de ce genre en tant que marqueur stratigraphique. La présence d'Angoniasaurus dans le bassin de Luang Prabang étend aussi son aire de répartition et confirme, en accord avec des études récentes portant sur les kannemeyeriiformes, une aire de répartition importante pour ce groupe pendant le Trias supérieur. La présence de dicynodontes herbivores et d'amphibiens chronisuchiens carnivores au Trias inférieur dans le bassin de Luang Prabang suggère la présence d'habitats variés occupés par des espèces ayant des relations trophiques complexes. Ces caractéristiques diffèrent des écosystèmes continentaux fortement perturbés décrits dans d'autres parties du monde au Trias inférieur. Ces caractéristiques singulières des écosystèmes continentaux de Luang Prabang, potentiellement liées à l'évolution géodynamique du domaine Est Téthysien au Trias inférieur, suggèrent soit une forte résilience de ces écosystèmes, soit que la crise permo-triasique ait eu un impact limité sur ces écosystèmes.

### 5.1.3 (o) Origine paléoenvironnementale et paléocéologique de la diversification des Watznaueria (coccolithophores) au Bajocien inférieur

Baptiste Suchéras-Marx<sup>1</sup>, Fabienne Giraud<sup>2</sup>, Emanuela Mattioli<sup>3</sup>, Thierry Adatte<sup>4</sup>

<sup>1</sup>LMV, Saint-Etienne

<sup>2</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>3</sup>LGLTPE, Lyon

<sup>4</sup>Institut des Sciences de la Terre, Université de Lausanne, Suisse

L'intervalle Aalénien supérieur-Bajocien inférieur (Jurassique moyen) est une période de temps qui comprend des grands changements tectoniques, environnementaux et biologiques. La limite Aalénien-Bajocien est marquée par une excursion négative du  $\delta^{13}\text{C}$ , enregistrée aussi bien sur le bois que sur le carbonate marin et résultant d'une augmentation de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère. Le Bajocien inférieur est, quant à lui, marqué par une excursion positive du  $\delta^{13}\text{C}$  enregistrée sur le carbonate uniquement. Cette excursion semble résulter d'une augmentation de la productivité primaire. Dans ce contexte, avec la diversification des ammonites et des radiolaires, un nouveau genre de coccolithe (plaques de calcaires micrométriques produit par des algues unicellulaires) se diversifie. Ce genre de coccolithe, les Watznaueria, va commencer à dominer les assemblages de nanfossiles au cours de cet événement et ce, jusqu'à la fin du Crétacé. Cette étude cherche à comprendre les forçages à l'origine de l'augmentation en nombre d'espèces et d'individus des Watznaueria au cours du Bajocien inférieur. Deux localités sont présentées, Chaudon-Norante dans le bassin du Sud-Est de la France et Cabo Mondego située dans le bassin lusitanien, GSSP de la limite Aalénien-Bajocien. Les Watznaueria semblent intégrer en deux phases successives la communauté préexistante ; leur augmentation n'engendrant pas de diminution en abondance des autres espèces. La première phase est marquée par l'expansion des Watznaueria à croix et une augmentation du phosphore sédimentaire, alors que la seconde phase est caractérisée par l'émergence des Watznaueria à pont et sans aire centrale et une diminution du phosphore sédimentaire. La première phase d'expansion des Watznaueria découle d'une augmentation de la fertilité des océans, alors que la seconde résulte d'une innovation écologique de certaines espèces de Watznaueria.

### 5.1.4 (o) Influence de la paléo-bathymétrie sur la répartition des peuplements d'ammonites et de foraminifères au Callovien dans les environs de Saïda (Algérie Occidentale)

Abdia Touahria<sup>1</sup>, Abbès Sebane<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire géodynamique des Bassins et Bilan Sédimentaire, Algérie

La formation des « Argiles de Saïda », très répandue dans le domaine tlemcénien constitue une formation constante depuis les confins algéro-marocains jusqu'aux plateaux de Saïda-Frenda. Dans la région de Saïda, cette formation repose sur une « Dalle de calcaires à ovoïdes stromatolitiques ferrugineuses ». Au sommet, elle est recouverte par les premiers bancs de grès plus grossiers à stratifications entrecroisées, appartenant à la formation des « Grès de Bou-Medine ».

Il s'agit d'une alternance rythmique d'argiles et de grès riches en figures sédimentaires, parfois entrecoupée par des intercalations souvent fossilifères. La limite inférieure, au dessus d'une lacune du Bathonien supérieur, coïncide avec une reprise de la sédimentation d'un abondant matériel argilo-gréseux. En bordure du Tiffrit, môle résistant, les « Argiles de Saïda » sont peu puissantes (50 m) mais s'épaississent rapidement vers le Nord et vers l'Ouest grâce au jeu de failles synsédimentaires. Dans ce secteur elles comprennent deux membres séparés par un niveau repère représenté par un banc finement gréseux à Rhizocoralium. Plusieurs séquences élémentaires de comblement s'enchaînent globalement de façon strato et grandocroissantes au fur et à mesure que le bassin s'approfondit.

La macrofaune en dehors des ammonites (Périsphinctidae, Oppeleidae, prédominance des Reineckeiidae, quelques Phylloceratidae et Lytoceratidae) est extrêmement pauvre. Elle se compose de rostrés de bélemnites et quelques brachiopodes très mal conservés. L'étude paléontologique des ammonites montre que leur succession est discontinue et incomplète, ceci s'explique par la sédimentation rythmique, composée d'argiles et de grès et démontre bien un certain nombre de lacunes.

Les foraminifères récoltés dans les niveaux marneux montrent une grande richesse de Nodosariidés associés à d'autres familles telles que les Spirillinidés, les Lituolidés, les Epistominidés, les Saccaminidés, les Hormosinidés, les Nébuclariidés et les Textulariidés. Leur répartition est contrôlée par les variations bathymétriques. Les formes hyalines calcaires appartenant à la famille des Nodosariidae sont abondantes dans les environnements moins profonds, à dominance calcaire du Bajocien (« formation du Ben Kmer ») alors que les Réophax et les Ophthalmidés se développent dans les milieux plus profonds riches en matériel terrigène.

### 5.1.5 (o) Biodiversité des dinoflagellés côtiers et hauturiers de la Téthys occidentale à l'Albien : les paramètres de contrôle

Raquel Sanchez Pellicer<sup>1,2</sup>, Edwige Masure<sup>2</sup>, Loïc Villier<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dpto Ciencias de la tierra, Universidad de Zaragoza, Espagne

<sup>2</sup>CR2P, Paris

Il a été montré dans l'Actuel l'existence de relations étroites entre les assemblages modernes des kystes de dinoflagellés et les paramètres des masses d'eau (température, salinité, saisonnalité) où vivaient les espèces planctoniques qui les ont produits. L'application des méthodes d'ordination permet d'exploiter ces relations à des fins de reconstitution paléo-environnementales et paléo-climatiques des périodes récentes (de Vernal et al. 1994).

Notre étude a pour objectif de produire un modèle de distribution paléo-environnementale pour des espèces disparues, d'âge Crétacé (Albien).

Les données proviennent de coupes côtières situées dans le Bassin Lusitanien et d'un site localisé au large du Portugal (forage DSDP 398D). Le calcul des indices de diversité, des analyses cluster et analyses factorielles des correspondances sur les données d'abondances relatives des dinokystes nous ont permis d'identifier l'influence de certains paramètres paléo-environnementaux sur la distribution des espèces et de ségréger les associations caractéristiques des milieux côtiers et des milieux marins francs. Certaines espèces apparaissent restreintes à un milieu, d'autres sont plus tolérantes. La distance à la côte est le facteur principal de ségrégation des espèces, les associations côtières diffèrent en fonction du contexte paléo-océanographique local.

Anne de Vernal, Jean-Louis Turon, and Joël Guiot 1994, Dinoflagellate cyst distribution in high-latitude marine environments and quantitative reconstruction of sea-surface salinity, temperature, and seasonality. *Can. J. Earth Sci.*, 31 :48-62.

### 5.1.6 (o) Astronomical modulation of the morphologic disparity of the coccolithophorids Noelaerhabdaceae over the last 800,000 years in the Gulf of Papua

Nicolas Barbarin<sup>1</sup>, Luc Beaufort<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

The Noelaerhabdaceae family is a very diversified coccolithophorids group since the Eocene and some problem of taxonomy inconsistencies remain sometimes confuse and arbitrary. This family contains genus such as Emiliana, Gephyrocapsa, Pseudoemiliana and Reticulofenestra. They are used as stratigraphic and climatic/environmental markers. The core MD052930, collected in the Gulf of Papua (Coral Sea) at a depth of 1,438 m, during the MD148 PECTEN cruise (IMAGES program), contain abundant and well-preserved calcareous nannofossil assemblages. The age model of this core is based on 14C dates and benthic/planktonic foraminifera oxygen isotopes. This 36-m long core contains a sedimentary record covering the last 800 kyr. An automatic recognition system (SYRACO) based on artificial neural networks and statistical methods was used to recognize and classify the calcareous nannofossils in several morphogroups and to measure biometric parameter such as size and mass. In total on the 480 studied samples, around 350,000 individuals of Noelaerhabdaceae have been identified and measured. The size distribution is successively unimodal and bimodal and the mass distribution variability is following that of size. The morphometric records contain periods of 400 kyr, 100 kyr, 22 and 20 kyr, corresponding to the eccentricity and precession periods. During high eccentricity times, the small coccoliths are more abundant and the disparity is higher. These observations indicate a seasonal modulation of the coccolithophorids morphology, at least at the family level. The acme of Gephyrocapsa caribbeanica and Emiliana huxleyi occurs during low eccentricity periods. We propose to use the mechanism behind these relations, as a new stratigraphic application of the coccolithophorids : the « cyclo-morpho-chronostratigraphy » that would enable to reach a resolution up to 20,000 years, or even 5,000 years.

### 5.1.7 (p) Body-size distribution of Early Triassic gastropods : macroevolutionary pattern or biased signal ?

Arnaud Brayard<sup>1</sup>, Emmanuel Fara<sup>1</sup>, Gilles Escarguel<sup>2</sup>, Nicolas Olivier<sup>2</sup>, Kevin Bylund<sup>3</sup>, James Jenks<sup>3</sup>, Daniel Stephen<sup>3</sup>, Emmanuelle Vennin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Biogéosciences, Dijon

<sup>2</sup>LGLTPE, Lyon

<sup>3</sup>Department of Earth Science ; Utah Valley University, Utah,  
 États-Unis

In the aftermath of the Permian-Triassic mass extinction, a reduction in size termed the « Lilliput effect » has been consensually argued for many marine organisms. Gastropods were amongst the first organisms used as a model for the Lilliput effect, mainly based on patterns first described from the western USA basin. This observation was later extrapolated to a global scale. However, only a few studies have tested the validity of the Lilliput effect on gastropods to determine whether the rarity of large-sized gastropods is a genuine signal or a preservation/sampling bias. Here we document abundant, large-sized gastropods from the Early Triassic of the southwestern USA. We show that these large specimens occurred in various sedimentary settings and belong to different taxa. Our study indicates that they are present in the same areas and rock units as microgastropods, but they were apparently overlooked by previous workers. This discrepancy arises because of the absence of replicate and dispersed sampling protocols at the outcrop and on a regional scale. The biasing effect of sampling is probably the main reason for the rarity of reports on large Early Triassic gastropods, whereas preservation biases seem secondary. Rarefaction-based simulations of the body-size distribution of a modern gastropod census show a strong decrease in the maximum sampled size coupled with a weak increase in the minimum sampled size, leading to a marked narrowing of the Min-Max sampled range when the biotic assemblage is artificially degraded (increasing undersampling). Overall, our study highlights the flaws of extrapolating local evidence based on biased observations for building global macroevolutionary models.

### 5.1.8 (p) Diversité et disparité des bélemnites au cours du Jurassique

Guillaume Dera<sup>1</sup>, Agathe Toumoulin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

A l'instar des ammonites, les bélemnites constituent un groupe de céphalopodes très abondant et particulièrement diversifié dans les écosystèmes marins du Mésozoïque. Cependant leurs tendances évolutives restent encore mal connues dans la mesure où les espèces restent difficiles à discriminer morphologiquement. En effet, les rostres présentent peu de caractères différenciés. Ainsi, les connaissances sur les modalités de diversification et d'extinction de ces organismes sont actuellement très lacunaires.

Dans ce travail, nous analysons les fluctuations de la diversité et de la morphologie générale des rostres au cours du temps. En s'appuyant sur plusieurs sources bibliographiques, une base de données inédite incluant une révision du nombre d'espèces a été créée et complétée par l'acquisition de données morphométriques (mesures linéaires) pour chacune d'entre elles. Combinée à des traitements statistiques, cette approche morphométrique permet de discriminer de façon robuste les différentes espèces et d'appréhender les radiations et crises biologiques au cours du temps. Au final, les tendances évolutives sont discutées en parallèle des différentes données paléoenvironnementales et paléoclimatiques.

## 5.2 Evolution de la Terre et de la vie au Précambrien (ASF)

### (Earth and life evolution during the pre-cambrian) (ASF)

#### Responsables :

- Mélina Macouin (GET, Toulouse)  
melina.macouin@get.obs-mip.fr
- Christophe Thomazo (Biogéosciences, Dijon)  
christophe.thomazo@u-bourgogne.fr

#### Résumé :

Cette session a pour objectifs de regrouper des chercheurs de différents champs disciplinaires afin de reconstruire l'histoire de la Terre dans ses périodes les plus reculées (Archéen et Protérozoïque). Cette session spécifique tentera de mettre en valeur les découvertes récentes relatives à ce monde primitif dans lequel la géodynamique et les cycles biogéochimiques se mettent en place. Ainsi, les différents aspects traités couvriront la reconstruction des paléogéographies précambriennes et la tectonique des premiers cratons, les cycles biogéochimiques globaux de divers éléments (O, C, Fe, S), l'évolution des conditions paléoenvironnementales et d'oxydo-réduction, la mise en place et la disparition des épisodes de Snowball Earth ou la compréhension des Cap carbonates. Aussi, les contributions relatives à l'étude des biomarqueurs et des premières traces fossiles permettront d'évaluer les grandes étapes de la vie primitive et d'élucider les possibles liens avec les modifications paléoenvironnementales survenues sur près de 3 milliards et demi d'années d'histoire de la Terre.

#### Mots clés :

Précambrien, cycles biogéochimiques, paléogéographie, vie primitive, origine de la vie, Snowball Earth, Cap carbonates.

### 5.2.1 *Keynote communication* : **The Turee Creek Drilling Project, Western Australia : Drilling across the 2.45 to 2.2 Ga old Great Oxidation Event and first global glaciation on Earth**

Pascal Philippot<sup>1</sup>, Martin Van Kranendonk<sup>2</sup>, Christophe Thomazo<sup>3</sup>,  
 Elodie Muller<sup>1</sup>, Johanna Marin-Carbonne<sup>1</sup>, Stefan Lalonde<sup>4</sup>,  
 Emmanuelle Vennin<sup>3</sup>, Jean-François Buoncristiani<sup>3</sup>, Franck Batton<sup>1</sup>,  
 Tom Caqueneau<sup>1</sup>, Adeline Pereira<sup>3</sup>, Ernesto Pecoits<sup>5</sup>, Noah  
 Planavsky<sup>6</sup>, Magali Ader<sup>1</sup>, Aude Isambert<sup>1</sup>, Hélène Bouquerel<sup>1</sup>,  
 Vincent Busigny<sup>1</sup>, Julie Carlut<sup>1</sup>, Pierre Cartigny<sup>1</sup>, Kevin Lepot<sup>7</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>The University of New South Wales, Australia

<sup>3</sup>Biogéosciences, Dijon

<sup>4</sup>LDO, Plouzané

<sup>5</sup>University of Alberta, Canada

<sup>6</sup>Yale University, États-Unis

<sup>7</sup>Géosystèmes, Lille

The oxygenation of the ocean-atmosphere systems was driven by a complex interplay between biological and environmental evolution, which has made this topic a centrepiece of research done in several disciplines. Despite long standing interest, there are still distinct schools of thought on the matter. In order to address this issue we performed a drilling campaign (supported by the project Labex « UnivEarths » hosted at Sorbonne Paris Cité and the Institut de Physique du Globe de Paris), within the 2.45 to 2.2 Ga old Turee Creek Group, Western Australia. This succession represents the only continuous stratigraphic sedimentary section worldwide hosting the Great Oxidation Event and the first global glaciation (Huronian glaciation). The principal aims of the project is to provide an integrated geological, mineralogical and isotope (C, N, S, Si, O, Fe, Cu, Zn, Ni, Mo, Cr, U) systematics on the same drill core samples from the nano-meter scale to the sedimentary basin level. Here we present the main drill cores obtained as part of a drilling operation performed during May 2013 and show how the different approaches to be developed should improve our understanding of the nature, rate, and duration of the rise of atmospheric oxygen on Earth. This in turn can help to explain the global atmosphere-related changes in sedimentary mineralization that occurred during the Paleoproterozoic.

### 5.2.2 (o) **Datation de la glaciation du Meteorite Bore Member, Pilbara, Australie : contrainte temporelle sur l'épisode de grande oxygénation de la Terre**

Tom Caqueneau<sup>1</sup>, Camille François<sup>1</sup>, Jean-Louis Paquette<sup>2</sup>, Johanna  
 Marin-Carbonne<sup>1</sup>, Pascal Philippot<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>LMV, Clermont-Ferrand

La transition archéen - protérozoïque est marquée par des changements globaux dans les différents réservoirs terrestres entre 2,45 et 2,2 Ga. L'oxygénation de l'atmosphère, qui a lieu au cours de cette période de transition, est étroitement liée à des épisodes majeurs de glaciations retrouvés sur différents cratons archéens (Afrique du Sud, Canada, Australie). Le groupe de Turee Creek (TC) dans la province de Hamersley sur le craton de Pilbara, Australie est une succession de sédiments silico-clastiques contrainte par des âges à 2450 ± 3Ma sur les rhyolites du Woongarra sous-jacentes et à 2209 ± 15Ma sur des basaltes de Cheela Springs sus-jacents. Ces basaltes appartiennent au groupe du Lower Wyloo discordant sur celui de TC. Trois forages (T1, T2, T3)

dans ce groupe de TC ont été réalisés à des endroits clés (Labex UnivEarthS), notamment englobant la formation glaciaire (diamictite) du Meteorite Bore Member (MBM). Les échantillons prélevés contenant de nombreuses petites monazites (<20µm), minéral accessoire pouvant parfois être diagénétique, ont été datés en U-Pb par analyse in situ sur lames minces en combinant microsonde électronique et LA-ICPMS. Les âges obtenus pour chacun des trois forages (T1, T2, T3) respectifs sont 2475 ± 22 Ma, 2474 ± 12 Ma et 2437 ± 16 Ma. Ces âges ont été interprétés comme marqueurs d'une sédimentation continue et concordante depuis les rhyolites du Woongarra. La partie supérieure du groupe de TC (T2, T3) est caractérisée par l'abondance de monazites datées à 1741 ± 13 Ma et 1738 ± 18 Ma et interprétée comme témoin d'un événement hydrothermal lié à une phase de déformation régionale (orogénèse Capricorn). Cet épisode n'est pas enregistré dans les formations de fer rubanées qui forment la base de la séquence de TC. Ces données permettent de penser que les diamictites du MBM correspondent à la première glaciation Huronienne, que l'on trouve en Amérique du Nord.

### 5.2.3 (o) **Redox evolution in deep geological time revealed by trace element enrichments in Precambrian iron formations**

Stefan Lalonde<sup>1</sup>, Kurt Konhauser<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LDO, Plouzané

<sup>2</sup>Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta, Edmonton, Canada

Iron oxyhydroxide minerals have precipitated directly from seawater throughout geological time. While such occurrences today are generally restricted to settings strongly influenced by hydrothermalism, during the Precambrian (prior to 541 Ma) iron oxyhydroxide muds accumulated over large areas of the ocean floor to be preserved as iron formation (IF). The Precambrian IF record is extensive, spanning every continent and dating as far back as Earth's oldest known sedimentary deposits. As nearly pure chemical sediments, the precipitates that formed IF captured elemental and isotopic signatures of evolving ancient seawater by sorption and co-precipitation reactions, rendering IF a rich record of ancient Earth's evolving marine geochemistry. That record is explored here using a database of >3000 chemical and isotopic analyses of IF compiled from literatures sources as well as new analyses. Emerging trace element proxies for the redox evolution of the ocean-atmosphere system, chromium (Cr) and uranium (U) in particular, appear to track with high temporal precision the onset, peak, and aftermath of Earth's earliest oxidative weathering ca. 2.5-2.0 Ga, the so-called Great Oxidation Event (GOE). In the case of Cr, muted Cr isotopic fractionations suggest that the GOE was characterized by an enhanced supply of Cr in reduced (Cr(III)) form. We suggest that only the oxidation of an abundant and previously stable crustal pyrite reservoir by aerobic-respiring, chemolithoautotrophic bacteria could have generated the degree of acidity required to solubilize reduced Cr from ultramafic source rocks and residual soils; in other words, Earth's first acid rock drainage. These emerging trace element proxies will also be discussed in the context of recent studies suggesting free atmospheric oxygen on the early Earth well before the ca. 2.5 Ga Great Oxidation Event.

### 5.2.4 (o) **Deconvolution of the sulfur cycle in Archean sulfate deposits using quadruple sulfur isotope (32S, 33S, 34S, 36S) analyses**

Elodie Muller<sup>1</sup>, Pascal Philippot<sup>1</sup>, Claire Rollion-Bard<sup>1</sup>, Pierre  
 Cartigny<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

Archean sulfate deposits are restricted to a few barite deposits in Western Australia, India and South Africa. These deposits formed episodically between 3.5 and 3.2 Ga ago and are associated with felsic volcanoclastic sediments. It has been showed that the sulfates and associated sulfides from Australia and South Africa define a negative trend in a mass dependent (MDF;  $\delta^{34}\text{S}$ ) vs mass independent (MIF;  $\Delta^{33}\text{S}$ ) fractionation diagram (Philippot et al., 2012). This trend has been attributed to an episode of intense release of volcanic  $\text{SO}_2$  into the atmosphere. In addition, many pyrites in barite deposits show strongly negative  $\delta^{34}\text{S}$  values that can be attributed to a MDF sulfur isotope effect caused by sulfur disproportionation or sulfate-reduction. In order to better understand the sulfur cycle associated with the formation of the barite deposits we performed a 4-S-isotope study of the samples from Australia and South Africa previously investigated for their 3 sulfur isotopes as well as new samples from India.

Bulk and in situ S-isotope analyses were performed on barites and pyrites with IRMS in dual-inlet mode and IMS 1280 HR2. Pyrites in komatiitic volcanics and carbonaceous cherts underlying the barite deposits from South Africa and Australia show a negative  $\Delta^{36}\text{S}$ - $\Delta^{33}\text{S}$  trend of -0.9 slope, which overlap the generally observed trend in Archean sediments attributed to UV-photolysis in an anoxic atmosphere. In contrast, pyrites associated with barite and felsic volcanic rocks follow a  $\Delta^{36}\text{S}$ - $\Delta^{33}\text{S}$  trend of  $\sim -7$  slope corresponding to a MDF signature. The occurrence of different  $\Delta^{36}\text{S}$ - $\Delta^{33}\text{S}$  sulfate/sulfide patterns is consistent with a MIF signature overprinted by MDF processes. Plotting the deviation from the reference sulfate-sulfide MIF array ( $\Delta^{33}\text{S} + \Delta^{36}\text{S}$ ) as a function of  $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$  fractionation between sulfate and sulfide ( $\delta^{34}\text{S}_{\text{sulfate}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{sulfide}}$ ) shows that both sulfur disproportionation and sulfate reduction are required to explain the range of sulfide isotopic compositions.

### 5.2.5 Keynote communication : Multiple sulphur isotopes unveil mechanism for the Neoproterozoic Oxygenation Event

Pierre Sans Jofre<sup>1</sup>, Pierre Cartigny<sup>2</sup>, Magali Ader<sup>2</sup>, Ricardo Trindade<sup>3</sup>, Afonso Nogueira<sup>4</sup>

<sup>1</sup>LDO, Plouzané

<sup>2</sup>IPG Paris

<sup>3</sup>Universidade de São Paulo, Brésil

<sup>4</sup>Universidade Federal do Para, Bélem, Brésil

We explore the connection between the Neoproterozoic Oxygenation Event (NOE) and the evolution of the sedimentary sulphate pool using multiple sulphur isotopes, including the less abundant  $^{33}\text{S}$  and  $^{36}\text{S}$  in addition to  $^{34}\text{S}$  and  $^{32}\text{S}$  (Farquhar et al., 2003). The NOE is widely believed to have been one of the key steps in the establishment of present day Earth's atmosphere and may have paved the way for the appearance and proliferation of animals (Shields-Zhou and Och, 2011). This event is recognized in the sedimentary record by significant changes in redox-tracers abundance, including trace metals (Mo, V, U), Rare Earth Elements, iron speciation, Cr and C isotopes (Frei et al., 2009; Parfitt et al., 2013; Sahoo et al., 2012; Shields-Zhou and Och, 2011). It also coincides with strong positive excursions in oceanic  $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$  ratios (Shields-Zhou and Och, 2011). Based on results from Brazilian carbonates covering late Cryogenian ( $\sim 635$  Ma) glacial deposits and data from the literature for coeval units (Johnston et al., 2005), we propose a scenario in which pyrite burial rate exceeds by far continental sulphate inputs in the aftermath of glaciation, decreasing the global sulphate watercolumn concentration. Such a strong depletion in the sulphate reservoir could be related to an increase in BSR activity which would limit  $\text{O}_2$  consumption by oxic respiration, resulting in a net accumulation of  $\text{O}_2$  in the ocean-atmosphere system during the early Ediacaran.

### 5.2.6 (o) Carbone isotope record of Ediacaran carbonate ramp, upper Araras group, Brazil

Isaac Rudnitzki<sup>1,2,3</sup>, Magali Ader<sup>1</sup>, Afonso Nogueira<sup>2</sup>, João Milhomem<sup>2</sup>, Alcides Sial<sup>4</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>Universidade Federal do Pará, Guamá, Brésil

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Geociência da Amazônia, Brésil

<sup>4</sup>Laboratório de Isótopos Estáveis - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brésil

The Araras Group, today exposed along the Paraguay Belt in Central Brazil, is one of the main sedimentary archive of the Ediacaran carbonate platform developed S-SW of Amazon Craton. Yet, the stratigraphy and chemostratigraphy of its upper part, corresponding to the Serra do Quilombo and Nobres formations, remain poorly explored. Based on facies analysis and carbon isotope analyses, this work provides new constraints on the Araras carbonate ramp evolution and correlation with the Neoproterozoic carbon isotope chemostratigraphic curve. The Serra do Quilombo Formation (SQF) can be individualized in deep ramp deposits, with  $\delta^{13}\text{C}$  values ranging from -0.6 and 0.95‰, overlain by middle ramp deposits, with  $\delta^{13}\text{C}$  values between -0.5 and 1.5‰. Above the SQF, the Nobres Formation (NF) corresponds to inner ramp deposits composed of tidal flats deposits with  $\delta^{13}\text{C}$  values between -2.19 to 1.0‰. The facies succession of the upper Araras Group thus evolves upward from deep ramp to inner ramp, indicating progradation of the carbonate ramp. The carbon isotope analyses reveal  $\delta^{13}\text{C}$  values with small but significant variations between platform subenvironments, defining an overall decreasing trend toward the top of the progradant succession. Three hypotheses can explain this pattern.  $\delta^{13}\text{C}$  variations can either record : 1) temporal variations in the carbon cycle, 2) lateral variations of the water dissolved inorganic carbon  $\delta^{13}\text{C}$  between platform subenvironments due to the delivery of  $^{12}\text{C}$  enriched dissolved inorganic carbon in inner ramp environments by continental runoff, or 3) variations in the organic and/or meteoric diagenesis impact on  $\delta^{13}\text{C}$  depending on subenvironments. This paper is a contribution to the Brazilian Institute of Amazonia Geosciences (INCT program-CNPq/MCT/FAPESPA-Proc. 573733/2008-2).

### 5.2.7 (o) Paleomagnetism of the Cryogenian Mirbat dikes, Oman : Paleogeographic constraints for the northeastern edge of the East African Orogen (EAO)

Damien Roques<sup>1</sup>, Sonia Rousse<sup>1</sup>, Méline Macouin<sup>1</sup>, Yoann Denèle<sup>1</sup>, Mathieu Benoit<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

The Mirbat dikes (100 km E of Salalah, Sultanate of Oman) dated between  $757 \pm 61$  Ma (Sm/Nd) to  $655 \pm 89$  Ma (Rb/Sr on whole rock) (Worthing, 2005) can provide important paleogeographic constraints for the Neoproterozoic basement of Oman a region which belong to the northeastern border of the EAO. The basaltic-to-rhyolitic dikes intruded a juvenile crust, composed of a HT metamorphic and migmatitic gneisses with late to post-kinematic basic to felsic intrusions (815 to 780 Ma, Mercogli et al, 2006) in a general context of Andean-type active margin (Denèle et al, 2012).

At the end of the formation of Gondwana (at about 540 Ma), Oman was accreted to the Arabian Nubian Shield (ANS) (see Fritz et al, 2013 and Johnson et al, 2011) and paleomagnetic poles for this period provide a paleogeographic position next to the Equator at about  $13^\circ$  or  $9^\circ$  of latitude (Kilner et al, 2005 and Kempf et al, 2000, respectively). However,

the geodynamic history of the northern part of the EAO during the accretion of Gondwana (before 540 Ma) remains poorly constrained. So, a new 700 Ma pole position on the Mirbat dikes could help to provide constraints on : (i) the paleolatitude of Mirbat basement at 700 Ma and (ii) the geodynamic implications that can be deduced for Gondwana accretion notably in terms of paleogeographic position and proximity with other cratons.

A total of 202 cores were sampled in March 2013 corresponding to 22 sites, distributed between Mirbat and Sadh. AF and thermal demagnetizations were realized in the GET laboratory (Toulouse, France), the IAG laboratory (Sao Paulo, Brazil) and the IPG laboratory (Paris, France). Here we will present a new paleomagnetic pole for the basement of Oman, constrained by field tests and discuss the geodynamic implications for the northeastern border of the EAO.

### 5.2.8 (o) Lower Cambrian-Ediacaran paleogeography and True Polar Wander with new paleomagnetic constraints from West African Craton

Boris Robert<sup>1</sup>, Jean Besse<sup>1</sup>, Olivier Blein<sup>2</sup>, Marianne Greff<sup>1</sup>, Thierry Baudin<sup>2</sup>, Fernand Lopes<sup>1</sup>, Saïd Meslouh<sup>3</sup>, Mohammed Belbadaoui<sup>4</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

<sup>3</sup>Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Rabat, Maroc

<sup>4</sup>Office National des Hydrocarbures et des Mines au Maroc, Rabat, Maroc

Paleomagnetic and geochronologic data suggest large oscillations of virtual geomagnetic poles for Laurentia and Baltica continents from high to low latitudes during Ediacaran (635-542 Ma). The interpretations are either oscillations of the Earth magnetic dipole between polar and equatorial positions or very fast tumbling of the whole Earth called True Polar Wander (TPW). In the latter hypothesis, all continents should move extremely rapidly in the same way (up to 4m/yr). In this study, we test these hypothesis by bringing new lower Cambrian-Ediacaran paleomagnetic data from another continent, the West African Craton (WAC). We sampled well-dated pyroclastic and lavas from volcanic rocks of the Ouarzazate and Taroudant groups in Anti-Atlas, (Morocco). 480 samples from 105 sites were thermally demagnetized in laboratory. Our preliminary results highlight two major groups of directions, mainly carried by hematite, magnetite contributing sometimes to the magnetization. The first group consists of dual polarity high inclination directions and the calculated paleolatitude is compatible with the lower Cambrian-Ediacaran apparent polar wander path (APWP) of Gondwana (Torsvik et al. 2012), assuming that the WAC was already accreted to Gondwana at this age. Nevertheless, a complete agreement between our pole and the APWP needs a rotation of 80° on a vertical axis of the sampled terrains. This rotation could be explained by regional tectonic events occurring during Cambrian/Ediacaran, the geological observations suggesting a transtensional context at this age. The second group, displaying single polarity shallow inclination directions with south-east declination, is close to the Permo-Carboniferous APWP poles of Gondwana and could correspond to a remagnetization acquired during the Kiaman reversed polarity superchron. These preliminary paleomagnetic results do not seem to favor neither a strong TPW nor equatorial Earth magnetic dipole episode during lower Cambrian-Ediacaran.

### 5.2.9 (p) Archean pCO<sub>2</sub> reconstructed with a 3D climate-carbon model

Guillaume Le Hir<sup>1</sup>, Frédéric Fluteau<sup>1</sup>, Yoram Teitler<sup>2</sup>, Pascal Philippot<sup>1</sup>, Yannick Donnadieu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IPG, Paris

<sup>2</sup>University of Western Australia, Australie

<sup>3</sup>LSCE, Gif-Sur-Yvette

During the Archean, the Sun's luminosity was 18 to 25% lower than present-day. Climate models generally infer that high concentrations of greenhouse gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) are required to satisfy the Faint Young Sun Paradox (i.e an Earth temperature at least as warm as today). However, constraints on paleo-pCO<sub>2</sub> gained from climate modelling studies cannot be directly compared to geological data because none of them consider the carbon cycle-climate equilibrium. Here, a 3D climate model coupled to a geochemical model is used to explore the impact of Archean conditions on long term pCO<sub>2</sub> and Earth's surface temperature evolution. Important variables that have been tested include (1) different scenarios of continental growth, (2) the effect of granitic vs basaltic lithologies of emerged continental surfaces and (3) different outgassing rates. Results of climate-carbon cycle simulations indicate that during the Early Archean the atmospheric pCO<sub>2</sub> was strongly dependant of the amount of emerged continental surfaces (ex : using a surface exposure of 80% that of present day results in a pCO<sub>2</sub> of 0.02 bar).

### 5.2.10 (p) Caractérisation sédimentologique et géochimique ( $\delta^{13}\text{C}$ carbonate) de l'enregistrement de la glaciation huronienne sur le craton de Pilbara (Turee Creek Group, Australie)

Adeline Pereira<sup>1</sup>, Christophe Thomazo<sup>1</sup>, Emmanuelle Vennin<sup>1</sup>, Jean-François Buoncristiani<sup>1</sup>, Martin Van Kranendonk<sup>2</sup>, Pascal Philippot<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Biogéosciences, Dijon

<sup>2</sup>The University of New South Wales, Australie

<sup>3</sup>IPG Paris

A la fin de l'Archéen et au début du Protérozoïque, la Terre enregistre un évènement majeur : le grand évènement d'oxygénation (i.e. GOE). Cet évènement unique dans l'histoire de la Terre correspond à une augmentation drastique de la concentration en oxygène (des océans et de l'atmosphère). En parallèle, les modèles montrent que les concentrations de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> diminuent pendant le GOE, entraînant ainsi un refroidissement lors de la transition Archéen-Protérozoïque. L'enregistrement sédimentaire au cours de cette période montre des dépôts glaciaires identifiés pour la première fois en 1970 par Young et définissant la glaciation huronienne. Jusqu'à présent les dépôts d'Amérique du Nord et d'Afrique ont largement été étudiés, en revanche peu de données sont disponibles sur l'Australie. En 2013, sur le craton de Pilbara trois forages traversant la formation Turee Creek ont été réalisés par l'IPGP (France) et l'Université du New South Wales (Australie). Les premiers résultats obtenus ont permis de mieux caractériser les environnements sédimentaires du Turee Creek Group. Ainsi on observe une première séquence déposée dans un environnement calme et protégé (type lagon ou grande baie) associée à une sédimentation siliceuse. Une seconde séquence montre un changement minéralogique brutal avec la mise en place d'une sédimentation carbonatée sans modification du milieu de dépôts et le passage progressif à des dépôts glaciaires est ensuite souligné par la présence d'un plancher glaciaire surmonté par des diamictites. La fin de la série se caractérise par une sédimentation carbonatée avec un hydrodynamisme plus important, en domaine ouvert (shoreface). Les premiers résultats isotopiques ( $\delta^{13}\text{C}$  carbonate) montre une large gamme de valeur (-12 ‰ à +5 ‰) et l'existence de plusieurs excursions isotopiques. Ces résultats préliminaires suggèrent qu'un lien

étroit entre conditions paléo-environnementales, dépôts sédimentaires et cycle du carbone est enregistré dans les sédiments du Turee Creek Group.

### 5.2.11 (p) Données paléomagnétiques préliminaires pour un essaim de dykes de l'évènement Uatumã à 1.8 Ga, craton amazonien (Pará, Brésil)

Paul Antonio<sup>1,2</sup>, Ricardo Trindade<sup>2</sup>, Davis Carvalho De Oliveira<sup>3</sup>, Anne Nédélec<sup>1</sup>, Manoel D'agrella-Filho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Sao Paulo - Brésil

<sup>3</sup>Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, Brésil

La position du craton amazonien et du craton ouest-africain en relation avec le supercontinent paleo-mesoproterozoïque Columbia/Nuna reste encore controversée malgré la publication de nouveaux pôles de référence pour le craton Amazonien (Bispo-Santos et al., 2014). Les tests paléomagnétiques pour les configurations proposées sont toutefois limités en raison de la qualité et du nombre de données paléomagnétiques disponibles, en particulier pour le Paléoproterozoïque.

Un volumineux magmatisme intraplaque a affecté le craton amazonien à 1.8 Ga et définit une grande province magmatique felsique (SLIP) appelé « évènement Uatumã ». Des dykes protérozoïques ont recoupé le socle archéen et sont des cibles de choix pour le paléomagnétisme.

Dans le but d'améliorer notre compréhension de l'évolution géodynamique, une étude paléomagnétique a été réalisée sur des dykes de microgranite ainsi que sur les dykes mafiques associés dans la Province de Carajás, à l'ouest du craton amazonien. Au total, 16 sites pour les dykes felsiques et 7 sites pour les dykes mafiques ont été échantillonnés (720 spécimens). Pour vérifier l'origine primaire de la direction paléomagnétique portée par ces dykes, des tests de contact ont été réalisés en échantillonnant la granodiorite Rio maria encaissante datée à 2.87 Ga.

Cette étude décrit un nouveau pôle de référence pour le craton Amazonien à 1.8 Ga. L'âge de ces dykes microgranitiques sera précisé par datation U-Pb sur zircon (SHRIMP). Ce nouveau pôle paléomagnétique à 1.8 Ga va donc permettre de tester la configuration SAMBA (South America Baltica) en comparant les pôles paléomagnétiques des différents blocs cratoniques, et de préciser la courbe de dérive apparente des pôles (CDAP) pour le craton amazonien au cours du Paléoproterozoïque.

Bispo-Santos, F., D'Agrella-Filho, M. S., Trindade, R. I., Janikian, L., & Reis, N. J. (2014). Was there SAMBA in Columbia? Paleomagnetic evidence from 1790Ma Avanavero mafic sills (northern Amazonian Craton). Precambrian Research.

### 5.2.12 (p) Évidence pour les cycles de Milanković sur la Terre primitive ? La cyclostratigraphie appliquée aux formations ferrifères Précambriennes

Etienne Emily<sup>1</sup>, Stefan Lalonde<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LDO, Plouzané

Au cours des 25 dernières années, l'évolution des méthodes de traitement du signal et le couplage de celles-ci avec la stratigraphie a permis de mettre en évidence les paramètres orbitaux (cycles de Milanković) de la Terre à des âges de plus en plus anciens. La cyclostratigraphie se base sur l'étude de séries sédimentaires rythmées qui sont traitées pour en extraire le contenu fréquentiel, permettant de caractériser à la fois

les paramètres orbitaux et de donner une chronologie relative de très haute résolution. Les formations ferrifères Précambriennes comptent parmi les plus remarquables des anciennes roches sédimentaires rythmées connues sur Terre, pour autant, les mécanismes conduisant à leur formation sont encore mal contraints. Dans notre étude, les méthodes de la cyclostratigraphie ont été appliquées aux variations de luminosité du dépôt du Dales Gorge Member (2.48 Ga) dans le bassin de Hamersley (Australie) afin de rechercher une signature des cycles orbitaux terrestres et donner des premières contraintes sur leurs paramètres au Précambrien. Paradoxalement, les lamines pour lesquelles ces dépôts sont les plus connus (bandes inférieures à 20 centimètres) ne montrent aucune rythmicité régulière. En revanche, c'est à grande échelle (supérieure au mètre) qu'une cyclicité s'exprime fortement. Les fréquences observées de ces cycles sont cohérentes avec un forçage orbital tout au long des 140 m du dépôt. Ces résultats confirment quantitativement un contrôle climatique sur la formation de ces dépôts.

### 5.2.13 (p) A new proterozoic paleomagnetic pole for the West African Craton? Results from doleritic dikes from Burkina Faso

Sonia Rousse<sup>1</sup>, Lenka Baratoux<sup>1</sup>, Cécile Cournède<sup>2</sup>, Seta Naba<sup>3</sup>, David Baratoux<sup>1</sup>, Mark Jessell<sup>4</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>3</sup>Université de Ouagadougou, Burkina Faso

<sup>4</sup>Centre for exploration targeting, The University of Western Australia, Australie

At least six generations of mafic dikes can be identified across the West African Craton based on airborne magnetic data. At least three of these generations can be found in Burkina Faso, but very little is known both on their age (which based on the available literature at the scale of the craton could range from mesoproterozoic to Jurassic) or their origin. The three dikes generations from Burkina Faso are oriented NE-SW, WNW-ESE and NW-SE and on the magnetic anomalies map some of these dykes can be followed over more than 300 km. Preliminary studies showed that texture, grain size and mineralogy vary considerably between the different dike generations. Since mafic dikes are a useful tool in mapping regional paleostress fields, locating mantle plumes and reconstructing ancient supercontinents, we initiated this study where paleomagnetism, magnetic properties, anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) and geochemical data are coupled to better constrain the dikes ages, the stress field in which they were emplaced as well as their potential emplacement mechanisms and to shed light on the particular history of each generation of dykes.

Here we will focus on the paleomagnetic results obtained for 11 sites (102 cores) sampled in the NW-SE generation, recently dated around 1.5 Ga. Both thermal and AF demagnetization as well as ASM measurements were realized on the samples. Due to the poor outcropping conditions, contacts tests couldn't be performed. Both the primary nature of the magnetization and the geodynamic possible implications for the paleogeography of the WAC in the proterozoic will be discussed.

## 5.3 Bouversements paléoenvironnementaux du Phanérozoïque (ASF)

### (Paleoenvironmental changes during the Phanerozoic) (ASF)

#### Responsables :

- Carine Lezin (GET, Toulouse)  
carine.lezin@get.obs-mip.fr
- Pierre Pellenard (Biogéosciences, Dijon)  
pierre.pellenard@u-bourgogne.fr

#### Résumé :

Cette session sera consacrée à l'enregistrement et aux causes des grands bouleversements paléoenvironnementaux survenus sur Terre à l'échelle du Phanérozoïque. Un intérêt tout particulier sera porté aux perturbations paléoclimatiques, aux événements anoxiques, et aux crises ou résurgences de la production carbonatée. Les objectifs de cette session sont donc de mieux documenter les changements paléoenvironnementaux anciens (pré-Quaternaires) à différentes échelles spatiales, de mieux contraindre leurs durées, et de déterminer leurs causes et conséquences. La mise en évidence des forçages internes (tectonique, volcanisme...) et/ou externes (climat, niveau marin, pCO<sub>2</sub>...) contrôlant directement ou indirectement les paléoécosystèmes et les paléoenvironnements sera également abordée. Dans ce contexte, cette session se veut donc résolument multidisciplinaire, en combinant des approches de sédimentologie, paléoécologie, stratigraphie, géochimie (isotopique, organique et inorganique) ou modélisation numérique des paléoclimats.

#### Mots clés :

Paléoclimat, paléoenvironnements, événements anoxiques, crises carbonatées, cycle du carbone, paléoenvironnements, Phanérozoïque.

#### Abstract :

This session will focus on major palaeoenvironmental disturbances and their causes during the Phanerozoic, including palaeoclimatic disturbances, anoxic events and carbonate production crises/recoveries. The objectives of this session are to better document pre-Quaternary palaeoenvironmental changes at different scales, to better constrain their durations and determine their causes and consequences. Internal (tectonics, volcanism) and/or external (climate, sea level change, pCO<sub>2</sub>) processes affecting palaeoecosystems and palaeoenvironments will also be addressed. Finally, this multidisciplinary session will combine sedimentological, palaeoecological, stratigraphical, geochemical (e.g. isotopes, organic and inorganic geochemistry) approaches and palaeoclimate models.

#### Keywords :

Palaeoclimate, palaeoenvironments, anoxic events, carbonate crisis, carbon cycle, Phanerozoic

### 5.3.1 (o) Modélisation numérique des changements climatiques de l'Ordovicien Supérieur (~ 445 Ma) avec le modèle océan-atmosphère FOAM et le modèle de glaces continentales GRISLI

Alexandre Pohl<sup>1</sup>, Yannick Donnadieu<sup>1</sup>, Guillaume Le Hir<sup>2</sup>, Christophe Dumas<sup>1</sup>, Jean-Baptiste Ladant<sup>1</sup>, Jean-François Buoncristiani<sup>3</sup>, Emmanuelle Vennin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LSCE, Gif sur Yvette

<sup>2</sup>IPG Paris

<sup>3</sup>Biogéosciences, Dijon

Le registre sédimentaire de l'Ordovicien Supérieur Hirnantien (~ 445 Ma) montre la mise en place de calottes polaires de grande extension sur le supercontinent Gondwana. Les mécanismes ayant permis l'entrée en glaciation restent cependant mal contraints. Les meilleures hypothèses envisagent aujourd'hui une chute de la teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>).

Plusieurs modélisations du climat Ordovicien ont été menées par le passé dans le but de contraindre la pCO<sub>2</sub> nécessaire à l'englacement. L'étude la plus récente remonte aujourd'hui à plus de 10 ans.

Nous proposons ici une modélisation du climat à l'Ordovicien par une méthode moderne à l'aide du modèle global couplé océan-atmosphère FOAM. Des tests de sensibilité sont menés sur la géographie de l'Ordovicien Supérieur pour des pCO<sub>2</sub> allant de 560 ppm à 4480 ppm. Contrairement aux études précédentes menées avec des modèles plus simples, nous montrons que la relation température globale - pCO<sub>2</sub> est non-linéaire lorsque la dynamique océanique est prise en compte. Pour de fortes pCO<sub>2</sub>, le climat est chaud, sans glace de mer dans l'hémisphère nord. Lorsque le forçage atmosphérique est légèrement diminué (de 2240 ppm à 1680 ppm), le climat se refroidit brutalement de près de 9°C et la glace de mer s'étend jusqu'aux moyennes latitudes. Nos résultats apportent donc une explication à la mise en place soudaine du pic glaciaire Hirnantien qui ne nécessite pas une chute brutale du CO<sub>2</sub>. Le modèle FOAM a ensuite été couplé de manière asynchrone avec le modèle thermodynamique de glaces continentales à haute résolution GRISLI. Grâce à la prise en compte de la rétroaction des glaces sur le climat, des calottes glaciaires de grande extension sont modélisées pour des pCO<sub>2</sub> bien plus élevées que précédemment proposé. Notre étude appuie la vision actuelle d'une glaciation de longue durée avec la présence de glaces au pôle Sud durant la majeure partie de l'Ordovicien.

### 5.3.2 (o) Climate changes and their relation to storm frequency in western France during the Late Jurassic (late Oxfordian-Kimmeridgian)

Claude Colombié<sup>1</sup>, Damien Carcel<sup>1</sup>, Fabienne Giraud<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LGLTPE, Lyon

<sup>2</sup>ISTerre, Grenoble

So far, the relationships between climate warming and cyclone frequency have not been defined. In this study, the impact of climatic changes on cyclone frequency in western France is addressed for the late Oxfordian-early Kimmeridgian period. The late Jurassic (late Oxfordian-Early Kimmeridgian) marl-limestone alternations of western France include abundant tempestites. Based on detailed facies analysis, 100 and 400 ky depositional sequences have been defined, and tempestite frequency have been calculated. Oxygen isotope analyses have been performed on brachiopod and oyster shells and on bulk rocks from three sections close to La Rochelle. Shell  $\delta^{18}\text{O}$  values give temperatures that

increase during the lower part of the early Kimmeridgian and then decrease. These results are consistent with previous results from literature. However, variations in bulk rock  $\delta^{18}\text{O}$  values, which are the opposite of variations in shell  $\delta^{18}\text{O}$  values, can not be interpreted as changes in temperature. Indeed, they correlate with the 400 ky changes in sea level. The lowest values correspond to 400 ky maximum-flooding deposits while the highest values coincide with 400 ky lowstand deposits. These high-resolution changes in bulk rock  $\delta^{18}\text{O}$  values could reflect variations in salinity. The increase in these values during the late Oxfordian and early Kimmeridgian could indicate an increase in salinity that may be related to a sea-level fall. Palynofacies analyses support this assumption. Variations in tempestite frequency also correlate with 400 ky changes in sea level. Tempestite frequency is higher during 400 ky maximum-flooding deposits than during 400 ky lowstand deposits. This is due to a better preservation of tempestites formed in shallow-water environments during high sea-level conditions. Consequently, the increase in frequency during the studied interval is not consistent with the decrease in sea level inferred from bulk rock  $\delta^{18}\text{O}$  values. Instead, it could be due to climate warming.

### 5.3.3 (o) Oxygen isotope records in fossil bioapatite reveal southern high-latitude low-temperature environment during the Early Cretaceous

Živilė Žigaitė<sup>1</sup>, Benjamin Kear<sup>2</sup>, Thomas Tütken<sup>3</sup>, Martin Whitehouse<sup>4</sup>, Michael Joachimski<sup>5</sup>, Teresa Jeffries<sup>6</sup>, Henning Blom<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Subdepartment of Evolution and Development, Uppsala University, Suède

<sup>2</sup>Department of Earth Sciences, Uppsala University, Suède

<sup>3</sup>Department of Applied and Analytical Palaeontology, Johannes Gutenberg University of Mainz, Allemagne

<sup>4</sup>Laboratory for Isotope Geology, Naturhistoriska Riksmuseet Frescativägen, Stockholm, Suède

<sup>5</sup>Geozentrum Nordbayern, University of Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Allemagne

<sup>6</sup>Imaging and Analysis Center, Science Facilities Department, Natural History Museum, London, Royaume-Uni

Fossil teeth of aquatic vertebrates from Lower Cretaceous high-latitude siliciclastic sediment sequences of SE Australia, representing a temperate to cold and seasonally freezing environment, were analysed for bioapatite oxygen isotope compositions. Lungfish and plesiosaur dental tissues were used for  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  analyses, following prior qualitative and quantitative assessments of potential diagenetic alterations of trace elemental compositions. The REE abundances, analysed by in-situ using laser ablation inductively coupled plasma mass-spectrometry, support the selective geochemical resilience of tissues, favoring enamel biomineral as most reliable proxy archive for geochemical reconstructions of the palaeoenvironment. In-situ  $\delta^{18}\text{O}$  measurements of all the fluorapatite oxygen components were performed at the NordSIM secondary ion microprobe and  $\delta^{18}\text{OPO}_4$  values of the oxygen from phosphatic component were measured on silverphosphate precipitates analyzed by high-temperature reduction continuous flow gas source mass-spectrometry. Dentine proved to be diagenetically most susceptible, showing moderate variations in  $\delta^{18}\text{O}$  values, particularly those obtained by secondary ion microprobe. In contrast, both methods provided highly adequate and repeatable low  $\delta^{18}\text{O}$  values within the enamel and enameloid of both fish and plesiosaur teeth from all the examined sediment sequences. Low bioapatite  $\delta^{18}\text{O}$  (reflecting low fresh water  $\delta^{18}\text{O}$ ) values independently suggest freezing climatic conditions, which confirms the existing sedimentological data for permafrost.

### 5.3.4 (o) Caractérisation géochimique et minéralogique de la limite Barremo-aptienne au niveau du jebel Serdj

Houda Khaled<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Ressources Minérales et Environnement, Université de Tunis El Manar, Tunisie

Le massif de Serdj se situe dans l'extrémité nord de la Tunisie centrale à la limite de la plateforme carbonatée qui s'étend sur une grande partie de la marge continentale sud de la Téthys au cours de l'aptien supérieur. Les échantillons levés ont été abordés sur plusieurs plans en appliquant la méthodologie de haute résolution : étude biostratigraphie, analyse chimique (éléments traces et majeurs) et analyses isotopique ( $\delta^{13}C$  et  $\delta^{18}O$ ). Sur le plan biostratigraphique, ces dépôts correspondent à des calcaires wackestones à mudstones avec des rares orbitolines, miliolles et textularidés qui influent un milieu de dépôt marin peu profond. L'étude minéralogique réalisée par diffraction des rayons X sur les échantillons bruts a révélé la présence de calcite avec des fortes teneurs (74%-99%) associés à des teneurs moyennes en quartz. Sur le plan chimostratigraphique nous avons développé la notion de traceurs géochimiques qui sont utilisés en termes de flux détritique, de productivité primaire et de conditions d'oxydo-réduction. Les rapports V/Cr, U/Th, V/(V+Ni) et Ni/Co sont utilisés pour évaluer les niveaux oxygène, dysoxygène et anoxygène. L'analyse isotopique de  $\delta^{13}C$  et de  $\delta^{18}O$  montre une excursion positive vers le sommet de la coupe qui peut être liée à l'installation de la plateforme carbonatée de l'Aptien.

### 5.3.5 (o) Paleoenvironmental conditions during the Late Aptian-Early Albian in the Essaouira-Agadir Basin (Morocco) : Evidence from sedimentology, calcareous nannofossils and stable isotope records

Walid Hassanein<sup>1</sup>, Fabienne Giraud<sup>1</sup>, Etienne Jaillard<sup>1</sup>, Emmanuel Robert<sup>2</sup>, Moussa Masrouf<sup>3</sup>, Mohamed Aly<sup>4</sup>, Mohamed Hammed<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>LGLTPE, Lyon

<sup>3</sup>Université Ibn Zohr, Département de Géologie, Agadir, Maroc

<sup>4</sup>Geology Department, Faculty of Science, Cairo University, Égypte

The aim of this work is to reconstruct the paleoenvironmental conditions prevailing during the Aptian-Albian transition in the Essaouira-Agadir Basin (EAB, Morocco). We carried out the analysis of sedimentary facies, calcareous nannofossils and stable isotopes of two sections located in the southern part of the basin. The EAB platform is interpreted as a ramp, and the sedimentary facies analysis indicates deepening upwards environments.

The  $\delta^{13}C$  presents a positive trend in the latest Aptian followed by a progressive decrease during the Early Albian, as observed for other Tethyan and Atlantic areas. The calcium carbonate content decreases upward in both sections through Early Albian times, and decreases from the eastern proximal Tinfoul section to the western distal Anzate section. The nannofossil total absolute abundance (NTAA) decreases in the upper part of both successions. The NTAA species richness and relative abundance of cold and meso-eutrophic taxa are higher in the distal section of Anzate with respect to the proximal section of Tinfoul. The variation of NTAA and relative abundance of meso-eutrophic taxa through Albian time are controlled by sea level changes. During high sea level periods, upwelling currents are active on the distal part of the ramp and bring the nutrient, leading to an increase of surface water fertility and nannofossil primary productivity in Anzate. Conversely, during low sea

level periods, the surface water fertility and nannofossil primary productivity are higher in Tinfoul, which suggest increasing nutrient influx by rivers.

During the Aptian-Albian transition, the variation in nannofossil primary productivity is mainly controlled by sea level fluctuations, and by the paleogeographic location of the studied sections. A drop in both carbonate production and *Nannoconus* spp. abundance, associated with deepening of the paleoenvironment and probably with cooler climatic conditions characterize the Aptian-Albian transition in the EAB.

### 5.3.6 (o) La crise globale de la limite Cénomanién-Turonien : mise au point basée sur des corrélations plate-forme/bassin à grande échelle

Danièle Grosheny<sup>1</sup>, Serge Ferry<sup>2</sup>, Delphine Desmares<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GéoRessources, Nancy

<sup>2</sup>Université de Lyon

<sup>3</sup>CR2P, Paris

Une analyse extensive montre que la limite Cénomanién-Turonien (C-T), connue par le dépôt généralisé de black shales, une anomalie positive en  $\delta^{13}C$  et l'extinction des rotalipores parmi les foraminifères planctoniques carénés correspond à une phase d'hétérogénéité séquentielle (transgressions ici, régressions là). Celle-ci met en doute ipso-facto la notion répandue d'une origine des black shales dans une plus grande productivité causée par une transgression générale. Nous y voyons plutôt la marque de confinements, notamment dans les bassins marginaux, à la suite de déformations ou d'accentuation de la subsidence contemporaines de la crise.

De l'analyse, il est à retenir quelques points fondamentaux :

- la crise est d'abord tectonique (pulsation globale ?).
- la grande transgression invoquée n'est pas généralisée et, de surcroît, n'est maximale qu'après la crise, au moment où les black shales océaniques ont disparu.
- il n'y a pas de signal glacio-eustatique démontré, éliminant ainsi la cause climatique pour la crise biologique.
- si les black shales océaniques sont contemporains de l'anomalie en  $\delta^{13}C$ , ceux-ci subsistent dans les bassins marginaux tard dans le Turonien inférieur, probablement par les effets morphologiques indirects de la crise tectonique.
- la disparition temporaire de la majeure partie des planctoniques carénés, notamment des rotalipores, souvent mise sur le compte d'une anoxie généralisée, n'est que très progressive au cours de l'anomalie en  $\delta^{13}C$  (les rotalipores survivent pendant au moins la moitié de l'intervalle océanique à black shales).
- dans certains bassins, la durée de la zone d'intervalle à Archeocretacea est extrêmement réduite.

Ces observations d'une part amoindrissent la notion de « crise » au passage C-T et, d'autre part, relancent la réflexion sur les mécanismes réels d'une transformation qui apparaît plutôt progressive, étalée sur quelques centaines de milliers d'années, mais qui s'accélère seulement vers la fin de l'anomalie géochimique.

### 5.3.7 (o) Enregistrement des dysoxies cénomano-turonien à l'ouest de la plateforme saharienne

Vanessa Lebedel<sup>1</sup>, Carine Lezin<sup>1</sup>, Bernard Andreu<sup>1</sup>, Mostafa El Ettachfini<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Université Chouaib Doukkali, Faculté des Sciences, Géologie, El Jadid, Maroc

L'étude de la plateforme carbonatée du Sillon Préafricain (SP, Maroc), de la coupe d'Agadir (marge atlantique marocaine), et les comparaisons effectuées avec la Tunisie septentrionale (Formation Bahloul, marge téthysienne), ont permis d'apporter de nouveaux éléments pour la compréhension de l'OAE2.

Dans le SP, au Cénomanién supérieur, les eaux sont bien oxygénées, excepté les eaux de fond des environnements les plus profonds [1], et la productivité est faible. A Agadir, les eaux sont bien oxygénées et la productivité faible, contrairement à Bahloul, où des conditions anoxiques sont enregistrées [2] et associées à une forte productivité. C'est au même moment que l'anoxie cénomano-turonienne atteint son maximum d'extension à l'échelle globale. A cette période, le SP est isolé de l'Atlantique par des hauts-fonds parfois émergés. L'origine téthysienne des faunes qui colonisent cette région suggère que la transgression cénomaniénne favorise l'arrivée d'eaux téthysiennes mal oxygénées jusqu'au SP.

Au Turonien inférieur, une dysoxie associée à une forte productivité est enregistrée sur l'ensemble du SP. A Agadir se mettent en place des black shales. Dans les deux régions, ces conditions dysoxiques perdurent durant la majeure partie du Turonien inférieur. Les eaux se réoxygènent pendant ou après la zone à Nodosoides. Au contraire, à Bahloul, les eaux sont oxygénées peu après la limite C/T, dès le sommet de la zone à *Watinoceras* [2]. Au Turonien inférieur, la majorité des eaux du globe sont oxygénées grâce à l'apparition de nouvelles circulations océaniques. Les eaux de l'Atlantique Nord tropical (plateau du Demerara, côtes atlantiques marocaines, SP) restent cependant dysoxiques et montrent une importante productivité. Cela s'expliquerait par la persistance du volcanisme et de l'hydrothermalisme du plateau Caraïbe, associé à une accentuation de l'activité des dorsales océaniques.

[1] Lebedel V., Lezin C., Andreu B., Wallez M.J., Ettachfani El M. & Riquier L. (2013). Geochemical and palaeoecological record of the Cenomanian-Turonian Anoxic Event in the carbonate platform of the Prafrikan Trough, Morocco. *Pal., Pal.*, 369, 79-98.

[2] Caron M., Dall'Agnolo S., Accarie H., Barrera E., Kauffman E.G., Amédéo F. & Robaszynski F. (2006). High-resolution stratigraphy of the Cenomanian Turonian boundary interval at Pueblo (USA) and wadiBahloul (Tunisia). *Géobios*, 39, 171-200.

### 5.3.8 (o) Le « Late Campanian Event » dans les bassins de Paris et d'Aquitaine : analyse couplée des apports terrigènes et du $\delta^{13}C$

Elise Chenot<sup>1</sup>, Jean-François Deconinck<sup>1</sup>, Pierre Pellenard<sup>1</sup>, Ludovic Bruneau<sup>1</sup>, Théophile Cocquerz<sup>1</sup>, Emmanuelle Pucéat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Biogéosciences, Dijon

L'objectif de cette étude couplée entre minéralogie des argiles et géochimie isotopique de la roche totale ( $\delta^{13}C$ ) est de comprendre l'origine du refroidissement climatique progressif qui caractérise le Crétacé supérieur et l'enchaînement des événements et des processus conduisant à ce changement climatique. Nous nous sommes focalisés sur le Campanien, étage au cours duquel se produisent trois événements isotopiques (excursions positive et négatives du  $\delta^{13}C$ ) enregistrés à l'échelle globale : le Santonian/Campanian Boundary Event (SCBE), le Late Campanian Event (LCE) et le Campanian/Maastrichtian Boundary Event (CMBE). Nous nous sommes particulièrement intéressés à l'enregistrement du LCE dans le forage de Poigny (Craie 701), situé dans le bassin de Paris, et dans la coupe de la carrière de Tercis-les-Bains dans le bassin Aquitain.

Au Campanien, la sédimentation argileuse de ces bassins est dominée par les interstratifiés Illite/Smectite (I/S R0). Les nouvelles données minéralogiques produites sur la coupe de Tercis-les-Bains indiquent que le LCE coïncide avec une diminution des proportions d'I/S R0 au profit de

l'illite, de la chlorite et de la kaolinite, changement qui traduit une reprise significative de l'érosion sur les domaines émergés dans le bassin Aquitain. Une évolution comparable est observée dans le bassin de Paris où l'identification du LCE, permise par de nouvelles acquisitions isotopiques, coïncide avec des apports d'illite plus importants. Cette reprise d'érosion, également enregistrée dans d'autres bassins sédimentaires, suggère une intensification des processus d'altération sur les domaines continentaux, qui pourraient, en partie, être responsables d'une baisse de la  $pCO_2$  et du refroidissement climatique à long terme enregistré au cours du Crétacé supérieur.

### 5.3.9 (o) Contrôle orbital à long terme sur les variations isotopiques du carbone et de l'oxygène durant le Mésozoïque

Mathieu Martinez<sup>1</sup>, Guillaume Dera<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau

<sup>2</sup>GET, Toulouse

Les fluctuations à long terme du  $\delta^{13}C$  et du  $\delta^{18}O$  de fossiles marins sont étudiées pour tester la présence de périodicités dans les signaux paléoenvironnementaux au cours du Mésozoïque. Le jeu de données analysé comprend près de 5000 valeurs isotopiques mesurées sur des rostrés de bélemnites d'Europe, et compilées sur un intervalle allant du début du Jurassique au Crétacé inférieur (200-130 Ma). Les données sont traitées par analyse spectrale en implémentant une méthode inédite de prise en compte des incertitudes sur la position des points au sein de l'échelle des temps géologiques. Le  $\delta^{18}O$  montre ainsi des périodicités significatives à 13 Ma, 4,4 Ma, 3 Ma et 1,5 Ma. Le  $\delta^{13}C$  montre en revanche des cyclicités significatives à 9,1 Ma, 3,3 Ma et 2 Ma. Cependant, seuls les cycles les plus longs restent significatifs après implémentation du modèle d'erreur temporelle. Pour la première fois, une cyclicité continue de 9,1 Ma est observée dans le cycle du carbone au Mésozoïque. Également identifiée au Cénozoïque (Boullila et al., 2012), cette périodicité pourrait correspondre à la longue modulation de l'excentricité. Un cycle de 4,4 Ma est exprimé dans le signal de  $\delta^{18}O$  de -172 Ma à -145 Ma, et pourrait correspondre à la longue modulation de l'obliquité prédite par les modèles astronomiques (Hinnov, 2013). Ces résultats montrent que les paramètres orbitaux à long terme sont stables sur les 200 derniers millions d'années. Nous suggérons aussi que les paramètres de l'orbite terrestre induisent un forçage du système climatique à long terme, même après les excursions isotopiques événementielles observées dans le Jurassique et au début du Crétacé.

Références :

Boullila, S., Galbrun, B., Laskar, J., Pälike, H., 2012. A  $\sim 9$  myr cycle in Cenozoic  $\delta^{13}C$  record and long-term orbital eccentricity modulation : Is there a link ? *EPSL* 317-318, 273-281.

Hinnov, L.A., 2013. Cyclostratigraphy and its revolutionizing applications in the earth and planetary sciences. *GSA Bulletin* 125, 1703-1734.

### 5.3.10 (o) New modelling constraints on the possible existence of high-latitudes ice sheets during the Cretaceous

Jean-Baptiste Ladant<sup>1</sup>, Yannick Donnadiéu<sup>1</sup>, Christophe Dumas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LSCE, Gif-sur-Yvette

Il est communément admis que le Crétacé fut une période de l'histoire terrestre durant laquelle le monde était libre de glace. Caractérisé par des températures plus élevées de plusieurs degrés et un niveau de l'océan supérieur d'environ 100-200 m par rapport à l'actuel, la greenhouse du Crétacé présente néanmoins quelques failles. De plus en plus

d'études montrent que certaines variations de  $\delta^{18}O$  et de niveau marin semblent s'expliquer uniquement par hypothèse glacio-eustatique, c'est à dire impliquant des calottes de glace aux pôles, potentiellement de grandes tailles (e.g. Bornemann et al. 2008, Haq 2014). Par ailleurs, si les niveaux de  $CO_2$  dans l'atmosphère étaient notoirement plus élevés qu'aujourd'hui, il subsiste une très forte incertitude sur la valeur et les variations du dioxyde de carbone et plus généralement des gaz à effets de serre.

En utilisant un ensemble de modèles comprenant le modèle couplé océan-atmosphère moyenne résolution FOAM, le modèle haute résolution LMDz et le modèle de calotte de glace GRISLI, nous étudions les conditions d'englacement des hautes latitudes au Crétacé en fonction de la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Pour cela, nous avons choisi trois époques particulières couvrant presque tout le Crétacé : le Maastrichtien (75 Ma) et l'Aptien (115 Ma) ainsi que la transition Cénomanién-Turonien (95 Ma) durant laquelle la présence de glace est la plus vivement débattue, cette période représentant l'optimum climatique du Crétacé.

Nous étudions ainsi l'influence combinée de la paléogéographie et du  $CO_2$  atmosphérique sur la mise en place ou non de calottes de glace aux hautes latitudes durant le Crétacé. Nous montrons en particulier que pour des taux de  $CO_2$  similaires, la seule paléogéographie a pu favoriser ou empêcher la formation pérenne de glace aux pôles. Nous proposons alors des seuils d'englacement en fonction du taux de  $CO_2$  dans l'atmosphère, qui permettent d'amener de nouvelles contraintes dans l'histoire de l'évolution du  $CO_2$  dans l'atmosphère qui reste particulièrement mal connue.

### 5.3.11 (o) Environmental changes at the KT boundary : A geochemical numerical approach

Frédéric Fluteau<sup>1</sup>, Guillaume Le Hir<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

The cause of Cretaceous/Tertiary (K/T) mass extinction event is a matter of debate since three decades and remains not fully understood yet. A first scenario connects the KT crisis with the impact of an asteroid in Yucatan while the second scenario associates the KT crisis with the emplacement of the Deccan traps in India. The fact that every mass extinction since the Devonian occurred during the emplacement of large basaltic provinces supports a causal relationship between the two events. However the consequences of bolide impact and volcanism have been poorly quantified. Using a biogeochemical model, we investigated how sulfur dioxide ( $SO_2$ ) and carbon dioxide ( $CO_2$ ) released within the atmosphere at the KT boundary destabilized the global climate-carbon cycle system. Pierrazo et al. (1998) estimated that the extraterrestrial bolide lead to the instantaneously injected from 880 Gt to 2,960 Gt of  $CO_2$  and from 150 to 460 Gt of  $SO_2$ . Self et al. (2006, 2008) and Chenet et al (2009) suggested that the emplacement of the Deccan traps released from 15,000 Gt to 35,000 Gt of  $CO_2$  and from 6,800 Gt of 17,000 Gt of  $SO_2$  over a nearly 400 kyr-long period. To decipher and quantify the environmental consequences of both events, we tested different scenarios : a pulse-like magmatic degassing scenario in absence of impact, a bolide impact in absence of volcanism, and a combination of pulse-like magmatic degassing scenarios and bolide impact.

### 5.3.12 (o) Facies et variations de la susceptibilité magnétique au passage paléocène/éocène (P/E), atlas de Marrakech, Maroc

Soufyane Sabir<sup>1</sup>, Abdelallah Ait-Addi<sup>1</sup>, Driss Chafiki<sup>1</sup>, Hocin Essefi<sup>2</sup>, Yaich Chokri<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, Maroc

<sup>2</sup>Université de Sfax, Sfax, Tunisie

Au Maroc le passage Paléocène/Eocène (P/E) est caractérisé par des dépôts carbonatés et phosphatés très abondants dans des petits bassins côtiers. Ces dépôts offriront l'occasion d'étudier les changements globaux et les événements survenus au passage P/E. Dans la présente contribution, nous avons identifié les changements paléo-environnementaux du passage P/E sur la base des analyses faciologiques et paléontologiques, du dosage du  $CaCO_3$  et les interprétations des mesures de la susceptibilité magnétique (SM). Les coupes étudiées affleurent dans la région de l'Atlas de Marrakech où les dépôts du P/E se présentent en petits cycles transgressifs/régressifs composés de marnes argileuses, marnes sableuses très bioturbées, calcaires bioclastiques/lumachelliques et calcaires sableux/conglomératiques, phosphatés riches en coprolithes. Les stratifications ondulées reflètent l'action permanente des vagues ou de houle sur la répartition des dépôts. L'ensemble de dépôts s'intègre dans plusieurs cycles de troisième ordre montrant des discontinuités fréquentes et des surfaces d'érosion. Des minces lits argileux (5 cm) interrompent souvent la séquence de calcaires et marnes sableuses phosphatées. Les variations du signal de la SM sont fonction de la nature de faciès et évoluent d'une façon inversement proportionnelle aux teneurs de  $CaCO_3$ . Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans certains niveaux de marnes sableuses et phosphatées et sont de l'ordre de  $2.50E-05$ . Ce qui explique la richesse de ces marnes en éléments d'origine lithogène paramagnétiques non rémanents (argiles, pyrite ...) dans une plateforme marine peu profonde avec des remontées périodiques probables d'upwelling atlantiques. Les valeurs très faibles et négatives caractérisent les calcaires bioclastiques et lumachelliques et confirment leur origine biogénique et riche en éléments diamagnétiques. La géométrie lenticulaire de ces dépôts rappelle celle de grands chenaux de marées à remplissages coquilliers.

### 5.3.13 (p) A diagenetic origin of the Early Triassic Smithian-Spathian carbon isotopic excursion ?

Christophe Thomazo<sup>1</sup>, Ivan Bour<sup>1</sup>, Emmanuelle Vennin<sup>1</sup>, Arnaud Brayard<sup>1</sup>, Olivier Mathieu<sup>1</sup>, Nicolas Olivier<sup>2</sup>, Gilles Escarguel<sup>2</sup>, Kevin Bylund<sup>3</sup>, Jim Jenks<sup>4</sup>, Dan Stephen<sup>5</sup>, Emmanuel Fara<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Biogéosciences, Dijon

<sup>2</sup>LGLTPE, Lyon

<sup>3</sup>140 South 700 East, Spanish Fork, Utah, États-Unis

<sup>4</sup>1134 Johnson Ridge Lane, West Jordan, Utah, États-Unis

<sup>5</sup>Department of Earth Science, Utah Valley University, Orem, Utah, États-Unis

Some of the largest carbon isotope excursions of the Phanerozoic are recorded in Lower Triassic sediments, deposited during the aftermath of the end-Permian mass extinction. Among them, a marked, global Smithian negative carbonate  $\delta^{13}C$  excursion has been identified with low values followed by an abrupt increase across the Smithian-Spathian boundary (SSB). This chemostratigraphic evolution is associated with paleontological evidences indicating a major collapse in terrestrial and marine ecosystems during the late Smithian. It is commonly assumed that Smithian-Spathian isotopic variations and biodiversity patterns are intimately linked through major perturbations of the exogenic carbon reservoir. Here, we present paired carbon isotopes measurements and trace elements concentrations from the Thaynes Group (Mineral Mountain, Utah, USA) that developed in peritidal to deep subtidal settings of the eastern Panthalassa. Our study allow to evaluate the extent to which the observed isotopic perturbations reflect changes in the Early Triassic global carbon cycle and oceanic chemistry during the biotic recovery. We

notably show that  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  variations (from -4.50 to +1.81‰) are remarkably correlated with Mn content ( $R^2=0.87$ ) in our samples and we suggested that isotopic values are strongly influenced by anoxic early diagenetic remineralization of organic matter in pore waters. SEM observations showing mineral close association between large pyrite framboids ( $> 30 \mu\text{m}$ ) and Mn bearing carbonates support this interpretation. Moreover, bulk organic matter  $\delta^{13}\text{C}$  signal is invariant across the SSB ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}} = -29.23 \pm 0.61\text{‰}$ ). We therefore suggest that the late Smithian marine ecosystem decline and its recovery are not directly linked to the carbon cycle behavior in our samples and question the global nature of the Smithian-Spathian carbon isotope variations.

### 5.3.14 (p) Le Miocène terminal de l'île d'Ibiza : étude des dépôts liés à la crise messinienne

Carine Lezin<sup>1</sup>, Olivier Driussi<sup>1</sup>, Raphaël Bourillot<sup>2</sup>, Agnès Maillard<sup>1</sup>, Franck Chanier<sup>3</sup>, Francis Odonne<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>ENSEGID, Pessac

<sup>3</sup>Géosystèmes, Lille

Dans le but de reconstituer les variations paléoenvironnementales au cours du Messinien sur les marges de la méditerranée, la série miocène d'Ibiza a fait l'objet d'une étude sédimentologique, faciologique et structurale.

Cette série se subdivise en 3 unités lithostratigraphiques qui reposent en discordance sur la série mésozoïque.

La première unité, à dominante carbonatée, se compose majoritairement de grainstones biodétritiques à figures sédimentaires typiques d'un environnement dominé par les dynamiques de vague et de marée. Ponctuellement ces grainstones passent latéralement à des niveaux enrichis en rhodolites et en coraux autochtones ou allochtones. Au sommet de cette unité s'intercalent des galets traduisant le démantèlement d'un paléorelief.

La seconde unité, à dominante détritique, se caractérise par une succession de séquences grano-décroissantes. Chaque séquence débute par des chenaux plus ou moins amalgamés à remplissage conglomératique et se termine par des marnes ou argiles rouges et paléosols. Les associations de faciès témoignent de la mise en place de cônes alluviaux édifiés par un système de réseaux et de chenaux en tresse. De fines intercalations de sédiments marins indiquent la proximité de la ligne de rivage.

La troisième unité, à dominante carbonatée, se caractérise par des calcaires oolithiques et/ou péloïdaux à larges stratifications obliques où à litages entrecroisés témoignant de l'installation de shoal oolithique sous la prédominance d'une dynamique tidale. Localement s'intercalent des niveaux plus ou moins épais riches en thrombolites et stromatolites.

L'analyse faciologique détaillée de cette série permet de proposer une reconstitution paléoenvironnementale et une interprétation séquentielle qui est comparée avec la succession sédimentaire bien connue de Sorbas. L'enregistrement de la chute du niveau marin au cours de la crise messinienne ainsi que le rôle de la tectonique sur la géométrie des corps sédimentaires est discuté.

### 5.3.15 (p) Mise en évidence de l'Évènement Anoxique Océanique 2 (EAO2) dans le Bassin aquitain à Urrugne (Pays-Basque) et à La Couronne (Charente)

Arthur Bieber<sup>1,2</sup>, Léa Keiser<sup>1</sup>, Thierry Mulder<sup>1</sup>, Philippe Martinez<sup>1</sup>, Laurent Londeix<sup>1</sup>, François Baudin<sup>3</sup>, Delphine Desmares<sup>4</sup>, Jean-Luc Auxière<sup>5</sup>, Jean-Loup Rubino<sup>2</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Talence

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau  
<sup>3</sup>ISTeP, Paris

<sup>4</sup>Centre de recherche sur la Paléobiodiversité et les Paléoenvironnements, Paris

<sup>5</sup>TOTAL, Paris-La Défense

Des événements anoxiques océaniques sont présents au cours du Crétacé et sont notamment caractérisés par le dépôt de black shales riches en matière organique (plusieurs % de COT) souvent propices à la formation d'une roche-mère pour les hydrocarbures. Ces événements se retrouvent de façon synchrone à l'échelle océanique, témoignage de leur impact global. L'EAO2 caractéristique de la limite Cénomanién-Turonien a été l'objet de nombreuses études dont l'objectif principal était de comprendre l'origine de cet événement et de l'anoxie associée. Les études en France concernant cet EAO ont été essentiellement menées dans le Bassin vocontien et le Bassin anglo-parisien, alors que le Bassin aquitain a été jusqu'alors peu étudié. Ce travail porte sur la mise en évidence et la caractérisation de cet événement dans le Bassin aquitain dans deux environnements sédimentaires différents : un bassin sédimentaire d'un peu moins de 1000 m de profondeur d'eau, dominé par des dépôts gravitaires essentiellement constitués de turbidites carbonatées (carrière d'Urrugne au Pays Basque) et une plate-forme subtidale à tidale (carrière de La Couronne à côté d'Angoulême). Pour ce faire, nous avons réalisé des analyses micropaléontologiques et stratigraphiques, sédimentologiques et géochimiques (dinokystes et foraminifères,  $\delta^{18}\text{O}$ , XRF, COT,  $\delta^{13}\text{C}$ ) sur de nombreux échantillons. Les résultats combinés mettent en évidence une subdivision à l'intérieur de l'événement notamment dans la composition élémentaire du sédiment. Ces données ne permettent pas de discriminer un phénomène unique déclencheur, et suggèrent qu'il s'agit de la combinaison de facteurs tels que l'activité mantellique, les paléo-courants, la répartition des terres émergées ou encore la chimie des océans. Ces résultats pourront être ultérieurement comparés avec ceux de la littérature pour améliorer la chronologie définissant la succession temporelle des événements conduisant à l'entrée et à la sortie de l'EAO 2.

### 5.3.16 (p) Paléocéanographie des zones boréales au Jurassique - Crétacé par l'analyse en $\epsilon\text{Nd}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des dents de poissons fossiles de Russie

Mathieu Fairon<sup>1,2</sup>, Guillaume Dera<sup>1</sup>, Emmanuelle Pucéat<sup>2</sup>, Evgeny Popov<sup>3</sup>, Mikhail Rogov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Biogéosciences, Dijon

<sup>3</sup>Université de Saratov, Saratov, Russie

<sup>4</sup>Institut de géologie, Académie des sciences de Russie, Moscou, Russie

Au cours de la dernière décennie, la conception d'un climat mésozoïque uniformément chaud, sans calotte de glace polaire, et stable a largement été réévaluée, en partie grâce à la multiplication des données isotopiques en oxygène mesurées sur différents fossiles marins. Pour le nord-ouest de l'océan Tethys, les nombreuses mesures réalisées sur les bélemnites et dents de poissons du Jurassique et Crétacé d'Europe ont mis en évidence de fortes fluctuations de la température de l'eau de mer, souvent associées à des perturbations environnementales ou biologiques majeures. Même si ce signal géochimique est actuellement le plus continu et fiable qui soit, son interprétation reste cependant débattue en l'absence de comparaisons à long terme avec d'autres régions du monde. En effet, comprendre l'extension spatiale des variations de températures est d'une grande importance, en particulier pour la discrimination des phénomènes climatiques globaux et des influences océaniques régionales (e.g., circulations de courants tropicaux ou boréaux).

Dans ce travail, nous tentons de combler cette lacune en apportant de

nouvelles données de températures de l'eau basées sur l'analyse isotopique de l'oxygène de dents de poissons du Jurassique et Crétacé de la Plateforme russe (Bassin de la Volga). Combinées aux quelques valeurs disponibles pour les bélemnites de Russie, ces nouvelles données permettent un suivi à long terme des fluctuations de températures de surface et de fond enregistrées en domaines boréaux. En parallèle, des analyses de la composition en isotopes du néodyme ont été réalisées pour déceler d'éventuelles modifications dans la circulation des masses d'eau et discriminer les effets de courants.

### 5.3.17 (p) Perturbations géochimiques et changements paléoenvironnementaux durant le Toarcien inférieur au NW de l'Europe

Carine Lézin<sup>1</sup>, Bernard Andreu<sup>1</sup>, Pierre Pellenard<sup>2</sup>, Jean-Luc Bouchez<sup>1</sup>, Laurent Emmanuel<sup>3</sup>, Philippe Fauré<sup>4</sup>, Philippe Landrein<sup>5</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Biogéosciences, Dijon

<sup>3</sup>iSTeP, Paris

<sup>4</sup>Muséum d'Histoire Naturelle de Toulouse

<sup>5</sup>ANDRA, Bure

L'événement anoxique océanique du Toarcien inférieur est associé à un changement environnemental rapide et sévère, dont les causes sont encore débattues.

Une nouvelle interprétation paléoenvironnementale [1] est proposée à partir d'analyses chimiques, minéralogiques et paléontologiques réalisées sur une carotte issue d'un forage Andra situé dans la partie orientale du Bassin de Paris. A la base du Toarcien (zone à *Tenuicostatum*), la présence d'eau de mer bien oxygénée se traduit par une faune abondante et diversifiée et une faible concentration des marqueurs des conditions redox.

À la base de la zone à *Serpentinum*, un important changement paléoenvironnemental se marque par une première phase d'enrichissement en matière organique (MO) (~ 12 % COT) pendant le shift négatif en  $\delta^{13}\text{C}$  (Carbone Isotope Excursion : CIE). Des conditions anoxiques/euxiniques, indiquées par un enrichissement en Co et le développement de pyrite framboïdale, conduisent à la disparition de la faune et permettent la conservation de MO. À cette époque, la faible concentration des marqueurs de productivité suggère une altération chimique faible sur le continent en raison d'un climat plutôt aride. Les faibles concentrations en Sr et en coccolithes sont dues à un apport d'eau douce, probablement venant de l'Arctique.

Suite à la CIE, la concentration en oxygène augmente progressivement jusqu'à la surface d'inondation maximale datée de la sous-zone à *Elegantulum*. La productivité primaire est faible.

La partie supérieure du Toarcien inférieur est caractérisée par un deuxième enrichissement en MO dû à un important apport de nutriments. L'augmentation de la production primaire génère des conditions anoxiques/euxiniques dans les sédiments et dans une partie de la colonne d'eau, conduisant à un enrichissement des marqueurs des conditions redox et provoquant la disparition de la faune. L'enrichissement en métaux est lié à une altération chimique intense sur le continent en raison d'un climat plus humide.

[1] Lézin C., Andreu B., Pellenard P., Bouchez J-L, Emmanuel L., Fauré Ph., Landrein Ph., 2013. Biological, chemical and mineralogical responses to paleoenvironmental changes during the Late Pliensbachian - Early Toarcian interval. *Chemical geology* 341, 1-15.

## 5.4 Variabilité climatique au Cénozoïque (ASF)

Cette session résulte de la fusion des trois sessions initialement proposées ci-dessous. *This session results from the merge of the three following sessions initially proposed.*

### Variabilité climatique au Cénozoïque (ASF)

#### Responsables :

- Marc De Rafelis (ISTeP, Paris)  
marc.de\_rafelis@upmc.fr
- Stéphanie Desprat (EPOC, Bordeaux)  
s.desprat@epoc.u-bordeaux1.fr
- Philippe Martinez (EPOC, Bordeaux)  
p.martinez@epoc.u-bordeaux1.fr

#### Résumé :

Une des motivations en paléoclimatologie est de documenter les changements climatiques passés, de comprendre les forçages et les réorganisations associés. Les différentes composantes du système Terre (hydrosphère, atmosphère, géosphère et biosphère) sont des vecteurs d'information permettant d'analyser, de restituer et de simuler ces changements. Les rétroactions observables au sein de ces différents compartiments en réponse aux perturbations environnementales (locales ou globales) sont autant d'informations pertinentes pour comprendre et anticiper les bouleversements récents.

Les archives sédimentaires du Cénozoïque nous offrent un large panel d'analogues au changement climatique actuel et futur tant dans l'intensité du réchauffement que dans sa rapidité. En particulier, les périodes chaudes passées telles que le PETM, le Pliocène ou encore les interglaciaires du Quaternaire, sont de bons exemples pour comprendre la réponse du système climatique à une forte augmentation des températures et du CO<sub>2</sub>, et à la fonte des calottes de glace. La variabilité rapide (de décennale à millénaire) du climat passée offre quant à elle des cas d'études particulièrement intéressants pour comprendre la réponse de la circulation océanique et atmosphérique face à une fonte rapide des glaces polaires.

Le but de cette session est donc de réunir des contributions qui s'intéressent aux grandes périodes chaudes du Cénozoïque et à la variabilité climatique rapide interglaciaire (excluant l'Holocène) et glaciaire à partir d'archives marines et continentales. Les contributions s'intéressant aux forçages de tels changements climatiques à partir de modélisations et comparaison modèle-données sont aussi sollicitées.

## Forçage climatique sur l'érosion, la mousson et la circulation océanique à l'échelle du Quaternaire

#### Responsables :

- Alexandra Gourolan (ISTerre, Grenoble)  
alexandra.gourolan@ujf-grenoble.fr
- Christophe Voisin (ISTerre, Grenoble)  
christophe.voisin@ujf-grenoble.fr
- Christophe Colin (GEOPS, Orsay)  
christophe.colin@u-psud.fr

#### Résumé :

L'ère quaternaire est caractérisée par de grands cycles glaciaires-interglaciaires responsables de perturbations tant dans les précipitations continentales, induisant des changements dans le débit des rivières, que dans la circulation océanique globale. De nombreuses études ont utilisé des sédiments marins afin de reconstruire ces deux changements dans le passé. Cette session s'interroge sur l'existence de retards temporels entre le changement climatique et l'enregistrement sédimentaire marin et sur l'impact des changements climatiques quaternaires ou de la variabilité de la mousson sur l'érosion continentale. Les attendus concernent notamment l'intégration de différentes techniques permettant de mieux comprendre l'influence de paramètres climatiques sur le processus géodynamique externe et la dynamique océanique pendant les cycles glaciaire-interglaciaire.

## Variabilité climatique Holocène : cycles, évènements abrupts et forçages

### (Holocene climate variability : cycles, abrupt changes and forcing factors)

#### Responsables :

- Philippe Sorrel (LGLTPE, Lyon)  
philippe.sorrel@univ-lyon1.fr
- Maxime Debret (M2C, Caen)  
maxime.debret@univ-rouen.fr

#### Résumé :

L'Holocène (= les derniers 11,800 ans) se caractérise par une variabilité climatique remarquable tant à l'échelle décennale/séculaire que millénaire, contrastant avec la vision d'un intervalle climatique d'une grande stabilité qui prévalait jusqu'ici. Les archives climatiques (*continentales, côtières et océaniques*) examinées au cours des dernières années ont révélé le rôle crucial des forçages internes/externes au

système sur les changements climatiques observés à court et plus long terme à l'Holocène, sur la base de cycles (e.g., 90, 200, 1500, 1800 ans, etc.) et d'évènements abrupts (e.g., événement à 8200 ans). De fait, la caractérisation précise des forçages impliqués est cruciale pour une meilleure compréhension des mécanismes climatiques à l'origine, sous différentes conditions aux limites (insolation, volume de glace, etc.).

Cette session accueillera des contributions portant sur l'identification des forçages contrôlant les changements climatiques rapides de l'Holocène sur la base d'une large sélection d'archives naturelles (sédiments lacustres/côtières/marins, carottes de glace, spéléothèmes, cernes de bois, etc.). Les contributions illustrant comment la fréquence et l'intensité des changements abrupts peuvent être reconnues, datées et quantifiées dans les enregistrements sont tout particulièrement encouragées. Enfin, les études s'intéressant à l'apport de nouvelles méthodologies destinées à la calibration (avec les données instrumentales disponibles) des signaux identifiés dans les archives sont également sollicitées, afin de renforcer encore la synergie existante pour l'intégration des données aux modèles climatiques.

#### Abstract :

The Holocene, which covers approximately the last 11,800 years of the Earth's history, is characterized by significant changes in the global climate with decadal to millennial-scale climate variability. This challenges the traditional view that climate has been fairly stable over the Holocene. During the last decade, a wide variety of climatic archives (e.g., in continental, coastal and oceanic settings) have been investigated in order to highlight the key role of internal and external forcing on climatic change on short- and longer timescales. The existence of widespread climatic change has been evidenced based on cycles (e.g., 90, 200, 1500, 1800 years, etc.) and abrupt events such as the 8200 yr BP event. Therefore, a thorough characterization of internal and external forcing is required for a better understanding of the mechanisms controlling climate variability with the underlying boundary conditions such as insolation, sea ice volume, etc.

The session will provide insight in the identification of forcing that control abrupt and rapid climatic changes during the Holocene based on a large panel of natural archives including lacustrine/coastal/marine sediments, ice cores, speleothems, tree rings, etc. Multi-proxy and interdisciplinary studies which aim at characterizing how the frequency and the intensity of abrupt events is recorded, dated and quantified in climatic archives are especially encouraged. Moreover, we also invite contributions focusing on methodological improvements for the calibration of new climate proxies, in order to strengthen synergy between proxy and modelling data for the reconstruction of past environmental change.

#### 5.4.1 (o) Saisonnalité à l'Éocène en Asie Centrale : du modèle numérique à la géochimie haute résolution des Ostréidés

Laurie Bougeois<sup>1</sup>, Julia Tindall<sup>2</sup>, Marc De Rafélis<sup>3</sup>, Guillaume Dupont-Nivet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

<sup>2</sup>School of Earth and Environment, University of Leeds, Royaume-Uni

<sup>3</sup>ISTeP, Paris

Le climat asiatique est aujourd'hui caractérisé par une forte dualité entre un climat de moussons au sud-est et un climat aride en Asie Centrale. Ces climats sont tous deux définis par une saisonnalité marquée, en terme de précipitations pour le premier ou de températures pour le second. La caractérisation des climats asiatiques paléogènes est encore peu établie, laissant ouverte la question de savoir quand cette dualité climatique s'est installée. Au Paléogène, les reliefs liés à la collision entre les plaques indienne et eurasiatique étaient encore naissant et la distribution entre terres et mers très différente de l'actuelle. À la fin de l'Éocène, une vaste mer épicontinentale et peu profonde (la Proto-Paratethys) qui s'étendait à travers l'Europe et l'Asie Centrale se retire et les hautes topographies asiatiques se mettent en place. Dans ce contexte géodynamique, nous cherchons à caractériser les fluctuations à haute fréquence du climat en Asie Centrale afin de caractériser la saisonnalité au cours de l'Éocène. Une nouvelle approche géochimique multi-proxy sur des coquilles d'huîtres ( $\delta^{18}O$ , Mg/Ca) nous permet d'avoir accès aux fluctuations saisonnières de température et de salinité en environnement côtier. D'autre part grâce à un modèle couplé océan-atmosphère nous accédons aux variations saisonnières atmosphériques (températures, précipitations) et océaniques (SST,  $\delta^{18}O_{sw}$ ) à l'Éocène. Ces deux approches indépendantes s'accordent pour caractériser le climat paléogène en Asie Centrale comme un climat déjà aride et dont les précipitations se concentrent pendant la moitié hivernale de l'année. Cette forte saisonnalité associée à une aridité marquée en Asie Centrale suggère la possibilité que les moussons asiatiques pouvaient être présentes dès l'Éocène. Toutefois ce climat, en contraste avec l'actuel, était probablement plus marqué par les westerlies en hiver du fait de l'influence de la mer Paratethys aujourd'hui remplacée par les hautes topographies du Pamir.

#### 5.4.2 (o) Synthèse paléoclimatique multi-échelle du Pliocène de Méditerranée

Marc De Rafélis<sup>1</sup>, Gabrielle Rousselle<sup>1</sup>, Aida El Kilany<sup>1</sup>, Fabrice Minoletti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

De part son caractère partiellement isolé du système océanique global, de l'étendue des surfaces continentales bordières et de sa position latitudinale, la Méditerranée est un géoécosystème marin très sensible aux variations environnementales. Le Pliocène, dernière période chaude reconnue au cours du long refroidissement global du Cénozoïque, est considéré comme le meilleur analogue récent des conditions climatiques attendues à l'horizon 2050-2100. Bien que cet intervalle temporel soit concerné par de nombreux programmes de internationaux de modélisation climatique, peu de données paléoenvironnementales issues des archives sédimentaires sont finalement disponibles pour le domaine méditerranéen. Nous présenterons une synthèse paléoclimatique et paléoenvironnementale basée sur l'étude géochimique (alcénones, isotopes stables C et O et éléments traces) des sédiments de la coupe de Capo Rossello (Sicile), référence stratigraphique pour le Pliocène avec la présence de 3 GSSPs. Les données sédimentologiques

et géochimiques isotopiques et élémentaires (bulk carbonate, foraminifères planctoniques et benthiques, alcénones) seront présentées à différentes échelles temporelles : cycles astro-climatiques, formations sédimentaires (Trubi vs Narbone) et période (Pliocène). La comparaison des reconstitutions de l'environnement marin et du climat avec celles du Pliocène global et de l'actuel atteste de la singularité du système méditerranéen à une période clé de l'histoire climatique de la Terre.

#### 5.4.3 (o) Millennial-scale climatic changes during MIS 11 in SW Europe and linkages with eastern North Atlantic hydrological changes

Stephanie Desprat<sup>1</sup>, Teresa Rodrigues<sup>2</sup>, Linda Rossignol<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Talence

<sup>2</sup>Divisão de Geologia e Georecursos Marinhas, Instituto de Investigação do Mar e da Atmosfera, Lisboa, Portugal

An increasing number of records show that millennial-scale changes appear as an inherent pattern of the Earth's climate superimposed to the glacial-interglacial variability. However, the origin and controlling factors modulating these climatic instabilities remain unclear. While Holocene rapid climate changes are widely investigated, few studies have focused on instabilities of past interglacial periods. Marine Isotopic Stage (MIS) 11 (from ~ 425,000 to 370,000 years ago) appears of particular interest to investigate the recurrence, amplitude and nature of climatic instabilities during period of dominant greenhouse gases-induced warming and higher than present-day sea-level probably resulting from the Greenland Ice Sheet and West Antarctic Ice Sheet collapse. Based on North Atlantic records, MIS11c is often considered as a long and relative stable interglacial. Sporadic information shows, however, that rapid climatic changes occurred during this interglacial period for instance in Antarctica and northern Europe. Previous work on NW Iberian sediments also reported some apparent rapid vegetation and climatic changes in SW Europe during MIS 11 but the low time-resolution of the records prevented any further discussion.

In the present study, we have revisited the NW Iberian margin record (core MD01-2447) to document MIS 11 climatic instabilities in SW Europe and mid-eastern North Atlantic, and have evaluated the marine and terrestrial linkages during those events. We will present new pollen and planktonic foraminifera-derived sea surface temperature (SST) data at higher time-resolution than that of the published MIS11c record. In addition, we will present new biomarker records (n-alkanes & n-alkan-1-ols, alkenones) to reconstruct variations in SST, continental input and deep water ventilation on the Iberian margin. Our results show suborbital vegetation changes in NW Iberia throughout MIS 11. In contrast with what we observed for other MIS, substantial variations in forest extent were not in phase with SST changes during the second half of MIS 11c, when ice volume was at the minimum in a context of strong GHG concentrations and higher than present-day sea-level.

#### 5.4.4 (o) A unique high resolution record of climate and vegetation changes during the EOT. The CDB1 core, Rennes Basin, France

Julie Ghirardi<sup>1,2</sup>, Jérémy Jacob<sup>1</sup>, Arnaud Huguet<sup>3</sup>, Hugues Bauer<sup>2</sup>, Claude Lemilbeau<sup>1</sup>, Jean-Jacques Chateaufort<sup>4</sup>, Florence Quesnel<sup>2</sup>, Christian Di Giovanni<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

<sup>3</sup>METIS, Paris

<sup>4</sup>Orléans

The climatic transition between Eocene and Oligocene (EOT) is marked by the change from a greenhouse to an icehouse climatic mode that affects both the marine and terrestrial realms. Terrestrial ecosystems are more sensitive to climate changes but suffer from the lack of continuous records. Recently, the BRGM retrieved a 340 m-long core from the Rennes Basin, which includes a lacustrine sedimentary series that covers the EOT.

In order to decipher the climatic evolution during the EOT and its impacts on ecosystems, we analyzed molecular biomarkers and their isotopic composition. Indices calculated from branched GDGT concentrations allowed us estimating the evolution of mean annual air temperature. The paleohydrological reconstruction relied on the dD of n-alkanes and the Average Chain Length (ACL) of n-alkanes. The evolution of temperature records is marked by two cooling episodes (one during the late Early Priabonian and a second during the Early Rupelian) and warming intervals observed during the Early Priabonian and the EOT. From the Late Priabonian to the Early Rupelian, recurrent ACL and n-alkanes dD values variations indicate changes in relative humidity. One of these variations occurs during the EOT and is interpreted as the transition from humid to dry conditions.

The evolution of vegetation is unraveled through specific biomarkers of ferns (fernanes), gymnosperms (diterpenes) and angiosperms (triterpene ketones) and compared with palynological results. The latter shows an increase in mesothermal species from the Late Eocene to the Early Oligocene, in agreement with the global cooling that characterizes this interval. However, the evolution of biomarkers does not show any global trend but high frequency changes from the Late Eocene to the Early Oligocene. These high frequencies are consistent with the rhythm of ACL values. The evolution of continental ecosystems thus appears mainly paced by changes in relative humidity.

#### 5.4.5 (o) Nd isotopes for tracking past circulation in the Mediterranean Sea

Quentin Dubois-Dauphin<sup>1</sup>, Christophe Colin<sup>1</sup>, Paolo Montagna<sup>2</sup>, Eric Douville<sup>3</sup>, Hiske Fink<sup>4</sup>, Dierk Hebbeln<sup>4</sup>, Norbert Frank<sup>5</sup>, Giuseppe Siani<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEOPS, Orsay

<sup>2</sup>Istituto di Science Marine, Bologna, Italie

<sup>3</sup>LSCE, Gif-sur-Yvette

<sup>4</sup>Center for Marine Environmental Sciences, University of Bremen, Allemagne

<sup>5</sup>Institute for Environmental Physics, Heidelberg, Allemagne

Several studies demonstrated that the Mediterranean Sea is highly sensitive to rapid climatic changes. Indeed, modifications of the Mediterranean Sea circulation occurred since the beginning of the last glacial period, especially during the Heinrich and Dansgaard-Oeschger events of the North Atlantic, supporting the idea of a strong relationship between the North Atlantic climate and the Mediterranean Sea hydrology. It has been suggested that this basin could play a significant role in triggering a switch from a stadial to an interstadial mode through the Mediterranean Outflow Waters, injecting saline waters in the northern Atlantic at times of weak AMOC. The aim of this study is to reconstruct the hydrology of the Mediterranean Sea during the Holocene characterized by a collapse or a reduction of deep convection during the deposit of Sapropel S1 (10,000-7000 yrs) and to determine potential impact of such variations on the AMOC. In order to track water masses through the Holocene, Neodymium isotopic composition ( $\epsilon$ Nd) has been measured on seawater, fossil deep-sea corals (*L. pertusa*, *M. oculata* and *D. dianthus*) and foraminifera from the Alboran Sea and Siculo-tunisian Strait (between 340 and 465 m) to constrain the present day seawater  $\epsilon$ Nd and to reconstruct the past water mass mixing. The Mediterranean Sea displays a wide range of  $\epsilon$ Nd values between the Atlantic inflow (-11.8)

and much more radiogenic eastern intermediate water masses ( $\sim -5$ ). Cold-water coral fragments have been dated from present day to 25 kyr. Preliminary results indicate that  $\epsilon$ Nd analysed on deep-sea corals from the Alboran Sea do not change significantly through time (between -8.5 and -9.2). Conversely,  $\epsilon$ Nd from deep-sea corals of the siculo-tunisian strait range from -4 to -8 during the last 35 kyr. Living and glacial cold-water corals are characterized by  $\epsilon$ Nd values around -7/-8. However, we notice more radiogenic peaks at 7 and 22 kyrs. Such variability could be induced by an increase in intermediate water production and/or a greater discharge of the Nile River.

#### 5.4.6 (o) Did high Neotethys subduction rates contribute to the Early Eocene Climatic Optimum ?

Guilhem Hoareau<sup>1,2</sup>, Brahimsamba Bomou<sup>2,3,4</sup>, Douwe Van Hinsbergen<sup>5</sup>, Nicolas Carry<sup>2</sup>, Didier Marquer<sup>2</sup>, Yannick Donnadiou<sup>4</sup>, Guillaume Le Hir<sup>3</sup>, Bruno Vrielynck<sup>6</sup>, Anne-Véronique Walter-Simonnet<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau

<sup>2</sup>Laboratoire Chrono-environnement, Besançon

<sup>3</sup>IPG Paris

<sup>4</sup>LSCE, Gif-sur-Yvette

<sup>5</sup>Department of Earth Sciences, Utrecht University, Pays-Bas

<sup>6</sup>ISTeP, Paris

The 58-51 Ma interval was characterized by a long-term increase of global temperatures (+4 to +6°C) up to the Early Eocene Climate Optimum (EECO, 52.9-50.7 Ma), corresponding to the warmest interval of the Cenozoic. It was recently suggested that sustained high atmospheric pCO<sub>2</sub>, controlling warm early Cenozoic climate, may have been released during Neotethys closure through the subduction of large amounts of pelagic carbonates and their recycling as CO<sub>2</sub> at arc volcanoes ("carbonate subduction factory"). To analyze the impact of Neotethys closure on the EECO, we have modeled the volume of subducted sediments and the amount of CO<sub>2</sub> emitted at active arc volcanoes along the northern Tethys margin. The impact of calculated CO<sub>2</sub> fluxes on the global temperature during Eocene time was then tested using a climate carbon cycle model (GEOCLIM). We first show that CO<sub>2</sub> production may have reached up to 1.55x10<sup>18</sup> mol/Ma during the EECO, ~4 to 35% higher than the modern global volcanic CO<sub>2</sub> output, owing to a dramatic India-Asia plate convergence increase. Subduction of thick Greater Indian continental margin carbonate sediments at ~55-50 Ma may also have led to additional CO<sub>2</sub> production of 3.35x10<sup>18</sup> mol/Ma during the EECO, making a total of 85% of the global volcanic CO<sub>2</sub> output. However, climate modelling demonstrates that the timing of CO<sub>2</sub> release only partially fit with the EECO, and that modelled maximum global temperature increase ( $\sim +2^\circ\text{C}$ ) does not reach values inferred from geochemical proxies. Similar conclusions arise from modelling based on other published CO<sub>2</sub> fluxes. These results demonstrate that CO<sub>2</sub> derived from decarbonation of Neotethyan lithosphere may have possibly contributed to, but certainly cannot account alone for the EECO. Other commonly cited sources of excess CO<sub>2</sub> such as enhanced igneous province volcanism also appear to be one order of magnitude below fluxes required by the model to fit with proxy data of pCO<sub>2</sub> and temperature at that time.

#### 5.4.7 (o) Mid-Holocene deepening of the southeastern Pacific oxygen minimum zone

Philippe Martinez<sup>1</sup>, Elfi Mollier-Vogel<sup>2</sup>, Karine Charlier<sup>1</sup>, Ralph R Schneider<sup>2</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Pessac

<sup>2</sup>Christian-Albrechts Universität-zu Kiel, Institut für  
 Geowissenschaften, Kiel, Allemagne

The southeastern Pacific margins host one of the most extended and intense oxygen minimum zone (OMZ) of the ocean. It is characterized by water column denitrification that largely influence the nitrogen balance in the ocean and may control N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> atmospheric concentrations in the late Quaternary. Off Peru, the upwelling and OMZ history since the last deglaciation is still sketchy due to large gaps in the sedimentation, and studies only focused on the central part of the system where upwelling and OMZ are the most intense. We here provide new high resolution nitrogen isotope (d15N) and productivity records from 4 cores collected between 3°S and 15°S spanning the last 11 ka.

The cores from the northern part of the OMZ reveal continuously low d15N values (4 to 5.5‰) typical for the average value of dissolved oceanic during the Holocene. In contrast, the d15N records from the central Peruvian margin are characterized by heavier values and much larger variations of about 4 to 5‰ in magnitude during the early and late Holocene. Interestingly, during the mid-Holocene interval 8.5-5 kyr, all d15N records reach a low similar isotopic value which indicates a reduction or a deepening of the OMZ. This minimum is also recognized at the southern edge of the OMZ off Southern Chile, indicative of a regional change of the OMZ between 5 and 8.5 kyr. The good correspondence between this mid-Holocene d15N minimum with a regional maximum in export production argues for an increase in upwelling intensity and the influence of the nutrient and oxygen rich equatorial undercurrent during a period dominated by La Nina-like conditions. This interpretation is corroborated by previous studies which demonstrated that the mid-Holocene interval was characterized by a strongest zonal equatorial sea-surface temperature gradient, a northward displacement of the Westerlies and a more northern position of the ITCZ.

#### 5.4.8 Keynote communication : Tectonic and climatic controls on erosion and weathering fluxes in New Zealand over the last climatic cycles

Antoine Coge<sup>1</sup>, Laure Meynadier<sup>1</sup>, Claude Allègre<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

Physical and chemical weathering is a major process governing rocks and chemical elements cycles at the Earth surface. Different forcing mechanisms such as climate and tectonics have been identified but their relative influences still need to be investigated. We approach this concern reporting Neodymium (Nd) isotopic composition time series in two sediment cores located on both sides of New Zealand. Both detrital and authigenic phases of the sediment have been measured in order to decouple oceanic and continental influences. Present and past climatic and oceanographic settings of this region have been already well studied and provide the framework in which addressing these questions.

Our results show glacial-interglacial variations of the authigenic signal, with larger amplitudes on the eastern core. Several hypothesis have been explored to explain these records. We demonstrate that the varying continental erosion over New Zealand controls the Nd isotopes records. Mixing calculations show that Nd discharge was 2 to 4 times higher during glacial times than during interglacials on the eastern side, whereas these variations are almost negligible on the western side. We suggest a scenario in which the wider glaciers extent during glacial periods triggered higher physical erosion with sediments characterized by higher specific surface, hence easier weatherable. The lower or even unresolvable amplitude on the western core is explained by a buffering by the high tectonic uplift rates observed on this side, which favour a transition

to another mode of erosion during interglacial, controlled by river incision. The temporal relationship between climate indicators like δ18O and the Nd isotopic composition shows non linearities of the erosion-weathering response to climate forcing. Those results contrast with previous studies using the same tracer, that showed stronger erosion and weathering over Himalaya during interglacial periods, showing possibly that the size of the basins could play an important role regarding the temporal evolution of erosion and weathering intensity. Finally this study illustrate the importance of considering the temporal dimension to study phenomena such as erosion or chemical weathering.

#### 5.4.9 (o) Glacial stillstands on the Bolivian Altiplano, From the LGM to the YD, Pattern and climatic implications

Léo Martin<sup>1</sup>, Pierre-Henri Blard<sup>1</sup>, Jérôme Lavé<sup>1</sup>, Mélody Premeillon<sup>2</sup>, Julien Charreau<sup>1</sup>, Vincent Jomelli<sup>3</sup>, Daniel Brunstein<sup>3</sup>, Didier Bourlès<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

<sup>2</sup>Ecole National Supérieure des Mines de Nancy, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy

<sup>3</sup>LGP, Meudon

<sup>4</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

Modifications of the global climate during the last deglaciation have been characterized by regional reorganization that may have in turn amplified or attenuated the global changes. Notably, the respective influences of the Southern and Northern Hemispheres are poorly understood in the Tropics. This underlines the importance of studying past climate variations in the Tropics, particularly in the poorly documented tropical mountain areas.

Cosmogenic exposure dating applied to the glacial landscapes provides temporal constraints on glacier fluctuations in response of climate variations. This permits high-resolution reconstructions of regional climates. In this work we present new cosmogenic ages from two different locations of the Bolivian Altiplano, the Nevado Sajama volcano (S18.11°-W66.88°) and the Zongo Valley (S16.25°-W68.11°).

On the Sajama, new cosmogenic <sup>3</sup>He dates support a late local glacial maximum, synchronous with the palaeolake Tauca highstand (ca. 16 ka) and contemporary to the north Atlantic Heinrich 1 (H1) event. Our data document also several recession episodes with the youngest one that seems to correspond to the Younger Dryas (YD) stadial (ca. 12 ka).

In the Zongo valley, two recessional moraines have indistinguishable cosmogenic <sup>10</sup>Be ages of ca. 17 ka, synchronous with the transgression of the Lake Tauca. Upward along the valley, a Younger Dryas stadial is clearly established, contemporary with the palaeolake Coipasa highstand.

These results confirm the sensitivity of South Hemisphere tropical glaciers to North Atlantic climate events, such as H1 or the YD. These glacial stadials are probably strongly driven by the wet conditions that prevailed during the central Altiplano palaeolake episodes. The identification of a Younger Dryas stadial in the Zongo valley, and also probably on the Sajama and Tunupa volcanoes (dating duplicates are still in progress), is an unprecedented report in this region.

#### 5.4.10 (o) Delayed erosion fingerprint from the Himalayas in the Indian Ocean at Milankovitch periods

Alexandra T. Gourlan<sup>1</sup>, Christophe Voisin<sup>1</sup>, Jean Braun<sup>1</sup>, Catherine Chauvel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

There is an ongoing debate about the importance of climate on the erosion of high relief, tectonically active regions such as the Himalayas. Here we quantify correlations between two proxies obtained on an 800 kyr long sedimentary record located in the Bay of Bengal [1] to demonstrate a strong link between climate and erosion in the Himalayas. The  $\delta^{18}\text{O}$  signal records temperature (and thus climate) while the Nd isotopic signal records the continental contribution to seawater coming from the erosion of the Himalayas. We show that both temperature and  $\epsilon\text{Nd}$  signals follow the main Milankovitch periods (23, 41 and 100 ky), but temperature changes always precede  $\epsilon\text{Nd}$  changes with a time shift increasing from 1000 to 7000 yr with the period of climatic fluctuations. To explain the delays, two models were proposed: diffusive [2] and erosion [3] models of Himalayas. For the first time, we demonstrate that a geochemical dataset can record and thus constrain the time lag in the erosional response of an active mountain belt to climate change.

[1] Gourolan et al. (2010) *Quaternary Sci. Rev.* 29 (19-20), 2484-2498.

[2] Castellort, S.; and Van den Driessche (2003) *Sedim. Geol.* 157, 3-13.

[3] Richter, F. M. and Turkian (1993) *Earth Planet. Sci. Lett.* 119, 121-131.

#### 5.4.11 (o) Le drainage final du Lac Agassiz (Ojibway) vers 8.3 ka BP et ses effets sur le système climat/océan de l'Atlantique Nord : faits et hypothèses

Claude Hillaire-Marcel<sup>1</sup>, Anne De Vernal<sup>1</sup>, Marie-Michèle Ouellet-Bernier<sup>1</sup>, Olivia Gibb<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre de recherche en géochimie et géodynamique, Montréal, Canada

Nous traitons ici des événements liés au drainage final du grand lac glaciaire Agassiz dans la mer du Labrador, via le détroit d'Hudson, vers ~8.3 ka BP. Dans la Baie d'Hudson, la déstabilisation de la calotte laurentidienne avait débuté ~500 ans plus tôt par les "crues de Cochrane" qui s'avancèrent plus de 1000 km vers le SE, dans le lac Agassiz, souvent attribuées à un effondrement d'un dôme glaciaire hudsonien, mais qui pourrait simplement avoir été l'effet d'un courant (ice stream) lié à la convergence des glaces du Keewatin, du Nouveau-Québec et, éventuellement, du bassin de Foxe. Lors de l'invasion marine ultérieure de la Baie d'Hudson, la marge SW de la calotte du Nouveau-Québec s'est stabilisée brièvement à la hauteur de la « moraine de Sakami ». Au large du détroit d'Hudson, l'épisode de drainage est marqué par une couche micritique carbonatée, bimodale (calcite » dolomite indiquant des sources détritiques à l'ouest du détroit d'Hudson). Le dépôt de la couche détritique carbonatée s'est effectué à l'intérieur des barres d'erreur des âges 14C de l'intervalle et pourrait avoir été extrêmement bref, selon certains modèles glaciologiques. Les foraminifères planctoniques présents au large du détroit d'Hudson n'ont enregistré aucun événement isotopique que l'on pourrait associer à la dilution des eaux de surface par l'eau douce du lac Agassiz du fait de leur habitat mésopélagique. Des modèles récents et la distribution des sédiments de drainage indiquent un cheminement des eaux douces sur le plateau continental du Labrador et sous forme de plumes hyperpycnales, le long du talus et du North-West Atlantic Mid-Ocean Channel. Au cours d'un intervalle de quelques centaines d'années au maximum, souvent associé au drainage, un refroidissement a été mis en évidence surtout en Europe de l'Ouest et au Groenland (cf. 8.2 ka-event). Les données sont moins convaincantes en ce qui a trait à un effet significatif sur la circulation méridionale de l'Atlantique Nord, bien que celle-ci soit envisageable. L'hypothèse d'une réorganisation des circulations atmosphériques, à la suite de l'ouverture de la Baie d'Hudson, reste cependant insuffisamment examinée. Elle serait en accord avec l'observation d'écarts dans les excès en deu-

térium observé, lors de l'épisode, entre les carottes de forage glaciaires groenlandaises GRIP et North-GRIP.

#### 5.4.12 (o) Past changes in bottom water circulation since the last deglaciation : New insights from stable isotopic composition and abundance of benthic foraminifera from the Levantine Sea

Marine Cornuault<sup>1</sup>, Laurence Vidal<sup>1</sup>, Kazuyo Tachikawa<sup>1</sup>, Laetitia Licari<sup>1</sup>, Corinne Sonzogni<sup>1</sup>, Marie Revel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

The Mediterranean Sea is located at a transition zone between subtropical high pressure and subpolar depression, and has been sensitive to on-going and past climate changes. A key information lies on the relationship between surface and bottom water conditions in the basin in response to various climate forcings. Past changes in bottom water circulation since the last deglaciation were investigated using the sediment core MD04-2722 (33°06'N, 33°30'E, 1780 m water depth, total core length of 36.96 m) which was collected in the south of Cyprus in the Eastern Levantine Sea. Since the water depth of the core location is close to the upper limit of estimated anoxic layer during the most recent sapropel S1 formation (1800 m), bottom waters at this site are expected to be sensitive to ventilation changes. We present here a combination of stable isotope data ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ) and abundance of benthic foraminifera over the past 23.6 cal ka B.P. In order to obtain continuous stable isotope records, multi-species analyses have been in progress including *Cibicides wuellerstorfi* (epibenthic species), *Cibicides pachyderma* (epibenthic to shallow infaunal species) and *Gyroidina* spp. (opportunistic species) that are highly abundant in core MD04-2722. Preliminary results show similar oxygen and carbon isotope values between *C. wuellerstorfi* and *C. pachyderma*. In contrast,  $\delta^{13}\text{C}$  values for *Gyroidina* spp. are systematically lower by  $2.88 \pm 0.35 \text{‰}$  than *C. wuellerstorfi*  $\delta^{13}\text{C}$  values, possibly reflecting pore-water. Obtained  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values of *C. wuellerstorfi* vary between 1.30 and 2.40 ‰ and between 2.91 and 4.16 ‰ respectively for the 23.6 to 12.2 ka interval. Oxygen data could reflect low temperatures of bottom water during the glacial period followed by a warming during the deglaciation. Carbon isotope trend and values are similar to data previously obtained from the SW Levantine Sea at 892 water depth and could reflect ventilated deep waters during the glacial period (23.6 to 20.4 ka) and a reduced ventilation until the S1 event. Faunal assemblages for the last 11.6 cal ka B.P. are characterized by the continuous occurrence of *Gyroidina* spp. through the record, which indicates relatively high trophic level and the presence of dissolved oxygen.

#### 5.4.13 (p) Rôle de l'Océan Austral dans les échanges de Carbone depuis la Dernière Déglaciation : Approche Géochimique et Micropaléontologique

Naoufel Haddam<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>GEOPS, Orsay

<sup>2</sup>LSCE, Gif-sur-Yvette

Nous libérons sans relâche des quantités considérables de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère depuis les deux derniers siècles. Pour comprendre la réaction de notre environnement face à ces émanations, il est important d'étudier les variations en CO<sub>2</sub> depuis le dernier maximum glaciaire, à partir d'archives telles que les carottes sédimentaires marines. Il existe

une forte corrélation entre la pCO<sub>2</sub> et les températures enregistrées au niveau des pôles. Mais les mécanismes impliqués dans cette corrélation restent flous.

L'amplitude des fluctuations de la pCO<sub>2</sub> atmosphérique durant les transitions glaciaires-interglaciaires peut être expliquée par les variations du système océan-atmosphère, en particulier dans les zones polaires et sub-polaires, à travers différents mécanismes océaniques de surface (variations de l'extension des calottes, de la production primaire, et de l'intensité des fronts et leurs migrations latitudinales) et profonds (variations de la ventilation). Ces mécanismes participent au contrôle des échanges océan-atmosphère en CO<sub>2</sub>.

La marge Sud-chilienne est positionnée sous l'influence des fronts polaires. Les déplacements de ces fronts sont enregistrés de façon indirecte dans les archives sédimentaires de cette zone, avec une haute résolution grâce aux taux élevés de sédimentation. Nous utilisons lors de cette étude trois carottes de type calypso : MD07-3100, MD07-3088 et MD07-3082 prélevées au large de la marge sud-Chilienne durant la campagne PACHIDERME. Ces carottes, alignées selon un transept latitudinal, permettront de restituer les variations d'intensité et migrations des fronts océaniques et atmosphériques (Westerlies). Cette étude multi-traceurs porte sur une approche géochimique ( $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{13}C$ ), micropaléontologique (assemblages de foraminifères benthiques et planctoniques) et géochronologique (SMA 14C, Tephros) qui permettra de clarifier les relations entre dynamique océanique et forçage atmosphérique.

Ce travail de thèse, qui a débuté en septembre 2013, est sous la direction de Giuseppe Siani (GEOPS ex-IDES, Giuseppe.Siani@u-psud.fr) et Elisabeth Michel (LSCE, Elisabeth.Michel@lsce.ipsl.fr).

#### 5.4.14 (p) Vegetation and fire regime changes in southwestern Europe during contrasting interglacials of the last 800,000 years

Stephanie Desprat<sup>1</sup>, Maria Fernanda Sanchez Goni<sup>1</sup>, Dulce Oliveira<sup>2</sup>, Gauthier Guillem<sup>1</sup>, Anne-Laure Daniau<sup>1</sup>, Teresa Rodrigues<sup>2</sup>, Emmanuelle Ducassou<sup>1</sup>, Frédérique Eynaud<sup>1</sup>, David Hodell<sup>3</sup>, Barbara Balestra<sup>4</sup>, José Abel Flores<sup>5</sup>, Joan O. Grimalt<sup>6</sup>, Francisco J. Sierro<sup>5</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Talence

<sup>2</sup>Divisão de Geologia e Georecursos Marinhos, Instituto de Investigação do Mar e da Atmosfera, Lisboa, Portugal

<sup>3</sup>Department of Earth Sciences, University of Cambridge, Royaume-Uni

<sup>4</sup>Institute of Marine Sciences, University of California Santa Cruz, États-Unis

<sup>5</sup>Department of Geology, Faculty of Sciences, Universidad de Salamanca, Espagne

<sup>6</sup>Institute of Environmental Assessment and Water Research, Barcelona, Espagne

Over the last 800 kyr, each interglacial has been the result of a specific interplay between the distribution of incoming solar radiation, greenhouse gas (GHG) concentrations and ice volume, leading to a variety of warm periods that differ in terms of intensity, character and duration. Based on the recently collected Iberian margin IODP site U1385, « Shackleton Site », we will present preliminary results on the signature of contrasting warm periods on southwestern European terrestrial ecosystems (vegetation and fire regime) during the last 800 kyr. We will compare pollen and microcharcoal data from warm periods characterized, like the current interglacial, by muted insolation changes, i.e. MIS 11c and MIS 19c, with a lukewarm interglacial (MIS 13e) and warmer periods than today such as MIS 9e and MIS 5e (MD95-2042). The preliminary results show for instance that the Mediterranean forest cover was, as expected, the most restricted during the lukewarm MIS 13 interglacial. More surprisingly, forest cover during MIS 11 and 19 remained

lower than during the Holocene, despite the analogy in astronomical forcing.

This work also intends to evaluate how astronomical parameters, ice volume, GHG concentrations and other processes may modulate the magnitude of the climate optimum and the millennial-scale variability. So far, the preliminary results show that trends in Mediterranean forest cover during the interglacials presented here strongly contrast with CO<sub>2</sub> concentration variations while they display a similar pattern to CH<sub>4</sub> concentration changes. This similarity may reinforce the formerly proposed hypothesis of a close coupling of the low and mid latitude hydrological changes.

#### 5.4.15 (p) Conditions paléo-climatiques de l'Altiplano durant la phase humide Tauca

Mélody Premaillon<sup>1</sup>, Pierre-Henri Blard<sup>1</sup>, Jérôme Lavé<sup>1</sup>, Léo Martin<sup>1</sup>, Julien Charreau<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

L'Altiplano est une région de haute altitude susceptible d'avoir enregistré des fluctuations climatiques régionales et globales de grande amplitude. L'évènement climatique global Heinrich I (17-15 ka BP) correspond sur l'Altiplano à une phase humide et à la présence du lac géant Tauca (surface de 50 000 km<sup>2</sup>). L'objectif de cette étude est de déterminer avec une précision inédite le champ spatial des précipitations pendant cette phase humide Tauca, afin de déterminer la configuration des circulations atmosphériques (masses d'air humide provenant de l'Atlantique ou du Pacifique ?) ayant engendré cet évènement.

La méthode mise en place ici consiste à utiliser les moraines de 7 glaciers synchrones du lac Tauca afin de remonter aux conditions climatiques ayant conduit aux extensions glaciaires correspondantes. L'utilisation de ces objets repose sur le fait que les glaciers ont une zone d'accumulation relativement réduite (quelques km<sup>2</sup>), ce qui leur permet d'échantillonner les précipitations avec une haute résolution spatiale. La reconstruction climatique s'est faite en deux étapes. Premièrement l'altitude de la ligne d'équilibre (ELA) des glaciers est estimée à partir de la position de leur moraine frontale et d'une méthode géométrique de type Accumulation area ratio (AAR) ou Toe to Headwall Altitude ratio (THAR). Ces méthodes donnent des résultats différant de moins de 300 m sur 6 glaciers modernes. La délimitation de l'extension glaciaire (i.e. différenciation neige/glace) pour la méthode AAR a été délimitée avec une précision optimale en utilisant des méthodes de télédétection. La seconde étape a été d'inverser l'ELA afin de remonter aux paléo-précipitations grâce à une relation empirique entre ELA d'une part et précipitations et températures moyennes d'autre part (Condom et al. 2007). En supposant durant la phase Tauca un refroidissement uniforme sur l'Altiplano de -6°C (Blard et al., 2009) par rapport à l'actuel, les paléo-précipitations apparaissent comme identiques aux précipitations actuelles dans les zones Sud et Est de l'Altiplano, plus faibles dans la partie Nord, et 2 à 3 fois plus élevées au centre et à l'Est du lac Tauca.

#### 5.4.16 (p) Variations climatiques du Pacifique équatorial au cours du Miocène-Pliocène

Gabrielle Rousselle<sup>1</sup>, Catherine Beltran<sup>1</sup>, Marc De Rafélis<sup>1</sup>, Marie-Alexandrine Sicre<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>LOCEAN, Paris

Les circulations atmosphériques et océaniques de l'actuel Pacifique équatorial sont directement influencées par les modifications climatiques et tectoniques qui surviennent au cours du Miocène et du Pliocène, avec la mise en place des glaciations Antarctique puis Arctique

et la fermeture progressive de couloirs océaniques tels que l'isthme de Panama et au seuil Indonésien.

Afin de caractériser la réponse climatique du Pacifique équatorial à ces changements, des analyses à partir de matériel minéral ( $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  sur carbonate total, *Noelaerhabdaceae* et *G. menardii*), et organique (indices d'insaturation Uk'37 et TEX86, et  $\delta^{13}\text{C}$  sur alcénones) ont été réalisées aux sites IODP 1335 et 1338 (est) et au site ODP 806 (ouest). L'évolution des températures de surface basée sur l'indice d'insaturation des alcénones au cours du Miocène et du Pliocène est combinée avec les enregistrements des isotopes stables menés sur le carbonate total, et sur des fractions fines enrichies en *Noelaerhabdaceae* ( $\delta^{18}\text{O}$ *Noelaerhabdaceae*). Les *Noelaerhabdaceae* étant responsables de la production des alcénones, combiner ces SSTs avec le  $\delta^{18}\text{O}$ *Noelaerhabdaceae* permet alors d'estimer le  $\delta^{18}\text{O}$  des eaux de surface, ainsi que les variations de la salinité de surface, à partir d'un même porteur du signal.

De plus, en se basant sur les gradients isotopiques entre la surface (*Noelaerhabdaceae*) et la subsurface (*G. menardii*), plusieurs périodes de remontée de la thermocline à l'est du Pacifique équatorial sont mises en évidence.

Les données mettent en évidence l'extension de la cold tongue au cours du Pliocène inférieur et l'intensification de l'upwelling équatorial, de pair avec un approfondissement de la thermocline à l'ouest et la formation de la warm pool. On voit ici le développement de l'actuelle asymétrie est-ouest des SSTs et de la profondeur de la thermocline du Pacifique équatorial, et l'émergence progressive de paléo-périodes El Niño et La Niña, précurseurs des oscillations ENSO.

#### 5.4.17 (p) Séquence marine haute résolution de l'Holocène dans le Golfe de Cadix

Emmanuelle Ducassou<sup>1</sup>, Barbara Balestra<sup>2</sup>, Carlos Alvarez-Zarikian<sup>3</sup>, Viviane Bout-Roumazielles<sup>4</sup>, Nathalie Combourieu Nebout<sup>5</sup>, José Abel Flores<sup>6</sup>

<sup>1</sup>EPOC, Talence

<sup>2</sup>Institute of Marine Sciences, University of California Santa Cruz, États-Unis

<sup>3</sup>Integrated Ocean Drilling Program, Texas A&M University, College Station, Texas, États-Unis

<sup>4</sup>Géosystèmes, Lille

<sup>5</sup>LSCE, Gif-sur-Yvette

<sup>6</sup>University of Salamanca, Department of Geology, Salamanca, Espagne

Le site de forage IODP U1390 (Expédition 339), situé à 992 m de profondeur sur la pente de la zone centrale du Golfe de Cadix, a enregistré les dépôts contouritiques liés à la circulation de branche inférieure de la Mediterranean Outflow Water (MOW). Les taux de sédimentation de la partie supérieure de ce site sont particulièrement importants, notamment à l'Holocène qui représente ~8 m d'épaisseur.

Cette séquence holocène a été étudiée à la fois d'un point de vue sédimentologique, pour comprendre les variations du courant de fond au cours du temps ainsi que les principaux apports terrigènes et d'un point de vue micropaléontologique et stratigraphique, pour évaluer notamment les conditions écologiques de surface et de fond.

Les données sédimentologiques consistent principalement en analyses granulométriques et des cortèges argileux. L'approche micropaléontologique a été menée à travers l'étude des assemblages de foraminifères planctoniques, de ptéropodes, de nannofossiles calcaires et d'os-tracodes. Les assemblages des foraminifères planctoniques et des ptéropodes à une telle résolution temporelle ont également permis d'établir une écostratigraphie de l'Holocène pour le Golfe de Cadix. Six âges radiocarbone (AMS) ont permis de dater cette séquence.

Les résultats préliminaires des assemblages des foraminifères planctoniques montrent des changements écologiques de surface marqués vers

8000 ans et 4200 ans. Trois bio-événements caractérisés par la domination de la forme senestre sur la forme dextre de *Globorotalia truncatulinoides* peuvent également servir de repères stratigraphiques pour l'Holocène. La préservation des assemblages de coccolithophoridés est bonne à modérée et les abondances de coccolithes montrent des valeurs fortes pendant l'Holocène.

Une diminution progressive du flux des minéraux argileux au cours de l'Holocène est observée avec une source plutôt liée à l'écoulement océanique sortant de la Méditerranée depuis 7500 ans.

#### 5.4.18 (p) Saharan dust input during the early-middle holocene transition

Gael Le Roux<sup>1</sup>, François De Vleeschouwer<sup>1</sup>, Nadine Mattielli<sup>2</sup>, Nathalie Fagel<sup>3</sup>

<sup>1</sup>EcoLab, Toulouse

<sup>2</sup>G-Time, Département des Sciences de la Terre et de l'Environnement, Université Libre de Bruxelles, Belgique

<sup>3</sup>AGEs Argiles, Géochimie et Environnement sédimentaires, Département de Géologie, Université de Liège, Belgique

The sources of dust deposited in Central Europe have changed abruptly during the Early-Middle Holocene Transition (EMHT) because of volcanic eruptions in the Massif Central and because of distal transport of Saharan dust (Le Roux et al., 2012). However, the timing of these abrupt changes as well as the dust sources remain poorly constrained, principally because of the lack of records across Europe. In an effort to refine the timing of dust events during the EMHT, we have investigated a peat core from the Pyrenees using trace elements, Nd isotopes and radiocarbon dating. We focus our study on the Early-Middle Holocene transition where our previous study (Le Roux et al., 2012) has shown that dramatic increases of dust occurred because of volcanic eruptions in the Chaîne des Puys (Massif Central) and because of distal transport of Saharan dust. Based on our new record, we can evidence that a Saharan dust pulse also occurred in the Pyrenees during the Early-Middle Holocene Transition. Its timing is similar to the one recorded in Central Europe. However because of the proximity with Northern Africa, Saharan dust pulses are more frequent in the Pyrenean site, which also displays a more radiogenic Nd background than the Swiss bog. No clear volcanic inputs were recorded. Our work has important implications in terms of relationships between inputs of desert dust in Europe, atmospheric transport and the rapid evolution of Sahara at the beginning of the Holocene.

Le Roux G., Fagel N., De Vleeschouwer F., Krachler M., Debaille V., Stille P., Mattielli N., van der Knaap W.O., van Leeuwen J.F.N., Shotyck W. (2012), Volcano- and climate-driven changes in atmospheric dust sources and fluxes since the Late Glacial in Central Europe, *Geology*, v. 40, p. 335-338

Acknowledgement : Sandra Moreels (ULB) is thanked for her significant analytical work during her master.

#### 5.4.19 (p) Sédimentation éolienne et crise environnementale holocène supérieur dans l'ouest de l'Afrique centrale

Denis Thiéblemont<sup>1</sup>, Catherine Guerrot<sup>1</sup>, Philippe Negrel<sup>1</sup>, Régis Braucher<sup>2</sup>, Didier Bourlès<sup>2</sup>, Christophe Rigollet<sup>1</sup>, Rémi Thiéblemont<sup>3</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>3</sup>Helmholtz Centre for Ocean Research, Kiel, Allemagne

L'ouest de l'Afrique centrale est recouvert d'une couche sablo-argileuse à argilo-sableuse, métrique à plurimétrique, assimilée à un sol tropical (« ferralsole »). Des observations et analyses issues d'un projet de cartographie géologique du Gabon nous conduisent à réinterpréter cet horizon comme un dépôt éolien. Les arguments fondant cette hypothèse sont multiples et souvent anciens : (1) permanence de la couche au travers du relief indifféremment des formations sous-jacentes ; (2) granulométrie à dominante finement sableuse à argileuse en fonction du secteur ; (3) homogénéité granulométrique et géochimique en un point donné ; (4) signatures géochimiques (ex. terres rares) et isotopiques ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ) relativement constantes et « discordantes » sur celles du substrat.

L'âge de dépôt, déduit de datations  $^{14}\text{C}$ , se place dans un intervalle restreint, essentiellement  $\sim 3000\text{-}2000$  BP, et jusqu'à une époque subactuelle (160 BP). Une quasi-constance de la teneur en  $^{10}\text{Be}$  du bas en haut d'un profil s'accorde avec cet âge très jeune.

Cette couche de surface repose sur une brèche polygénique (Stone Line) issue du remaniement des formations environnantes et incluant une industrie lithique d'Age de la Pierre Ancien à Moyen. Localement, ce remaniement a pu être daté vers  $\sim 4000$  BP par la méthode  $^{14}\text{C}$ . Sa vigueur, opposée à l'aspect homogène de la couche supérieure, indique une variation rapide de l'environnement sédimentologique : (1) dynamique de transport hydraulique souvent intense dans le premier cas ; (2) dépôt « en masse » sans transport latéral ultérieur dans le second.

Les âges obtenus sur la couche de surface situent son dépôt dans le cours d'une crise environnementale majeure ( $\sim 3000\text{-}2000$  BP) ayant provoqué une régression de la forêt équatoriale.

Une vitesse d'accumulation moyenne d'au moins 1 m/1000 ans témoigne de l'intensité du phénomène éolien. Les données isotopiques (Nd) combinés aux contraintes atmosphériques situent la source des particules fines au NW du désert du Namib.

#### 5.4.20 (p) Etude sédimentologique et paléoenvironnementale des formations quaternaires alluvionnaires d'oued Birzgane, El Ma El Abiod, W de Tébessa, N-E Algérie

Nabil Defaffia<sup>1,2</sup>, S. Abdessadok<sup>2</sup>, A. Djerrab<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Département de Préhistoire, MNHN, Paris

<sup>2</sup>Université 08 Mai 1945 de Guelma, Département d'Histoire et d'Archéologie, Algérie

Les dépôts quaternaires dans la région de Tébessa (Algérie) ont fait l'objet de nombreuses recherches. Ici, notre étude concerne les dépôts des terrasses fluviales d'oued Birzgane qui se trouve au sud de la ville de Tébessa en Algérie orientale. Il s'agit d'un nouveau site archéologique découvert en 2010 par notre équipe et qui renferme un matériel du paléolithique moyen (probablement moustérien, en cours d'étude), caractérisé par l'absence des pièces pédonculées. De récentes datations du niveau archéologique ont donné un âge de 110000 ans BP MIS. Afin de connaître le cadre de vie de cette civilisation préhistorique et d'obtenir une chronologie la plus fiable possible des événements, nous avons privilégié des méthodes (sédimentologie, minéralogie, paléomagnétisme environnemental, datation) permettant d'obtenir des informations sur le milieu de dépôt et la chronologie des événements.

Les variations des valeurs des paramètres granulométriques nous renseignent sur la régularité du niveau énergétique de l'agent de transport. L'exoscopie a permis de différencier l'histoire sédimentaire du quartz (altération, transport continental aquatique, puis parfois reprise glaciaire). L'examen au MEB des surfaces des grains de quartz a permis l'identification de figures variées en rapport soit avec le réseau cristallin primitif des quartz soit avec les actions corrosives propres au milieu d'altération. L'étude des minéraux argileux permet de conclure que l'origine des sédiments à smectite, kaolinite et illite des trois niveaux stratigraphiques doit être recherchée dans le bassin versant de la région

étudiée.

Les données du magnétisme environnemental met en évidence des variations significatives dans les conditions d'oxygénation (aérobie/anaérobie), ce qui permet de déduire que les sédiments des niveaux stratigraphiques 1 et 2 ont été déposés par le vent et se sont formés pendant un climat sec. Au contraire, les sédiments de niveau stratigraphique 3 ont pris naissance sous un climat peu humide.

En conclusion, nous proposons une reconstitution des conditions d'environnement au cours de la formation de la terrasse.

#### 5.4.21 (p) Evolution récente de la sédimentation des lacs Azigza et Sidi Ali (moyen Atlas, Maroc) : implications climatiques

Hanane Reddad<sup>1</sup>, Issam Etabaai<sup>2</sup>, Brahim Damnati<sup>2</sup>, Yahia Elkalki<sup>1</sup>, Maurice Taieb<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Recherche « Dynamique des Paysages, Risques et Patrimoine », Université Sultan Moulay Slimane, Beni Mellal, Maroc

<sup>2</sup>Laboratoire Environnement, Océanologie et Ressources Naturelles, Université Abdel Malek Essaâdi, Tanger, Maroc

<sup>3</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

Le présent travail est une contribution à la reconstitution des fluctuations hydrologiques et climatiques récentes qu'a connu le Maroc en général et le Moyen Atlas en particulier, à la jonction des influences atmosphériques régionales et globales. Le matériel d'étude est constitué de sédiments provenant de deux systèmes lacustres : Aguelmam Azigza, Aguelmam Sidi Ali. La méthodologie entreprise au cours de cette recherche est basée sur l'analyse sédimentologique, géochimique et écologique des sédiments lacustres. Les résultats révèlent que la sédimentation subactuelle est considérablement influencée par la variabilité climatique et les perturbations anthropiques. La persistance des sécheresses et l'élévation des températures au cours des dernières décennies ont été reflétées par une prédominance de la fraction carbonatée suite à l'augmentation de la précipitation des carbonates. De courtes phases humides ont été enregistrées par une augmentation périodique des éléments détritiques aluminosilicatés et ferromagnésiens. Le taux de sédimentation dans le lac Azigza est nettement inférieur à celui du lac Sidi Ali. La diminution du taux de sédimentation dans le premier lac est due à la réduction de l'écoulement de surface et à l'assèchement des affluents, qui fait que la sédimentation actuelle dépend essentiellement de l'action éolienne qui redistribue les matériaux au niveau des sols et des terrasses exondées. Le taux de sédimentation élevé du lac Sidi Ali est une conséquence directe du défrichement de son bassin versant. Ce changement du comportement hydrologique et climatique est attribué à la rupture majeure observée à partir de 1970 et exprimée par la persistance de la phase positive de l'oscillation Nord Atlantique (NAO).

#### 5.4.22 (p) High climatic resolution during the last 13,000 cal years BP inferred from a charcoal record from Lake Ifrah (Middle atlas, Morocco) West Mediterranean region

Hanane Reddad<sup>1</sup>, Brahim Damnati<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Recherche « Dynamique des Paysages, Risques et Patrimoine », Université Sultan Moulay Slimane, Beni Mellal, Maroc

<sup>2</sup>Laboratoire Environnement, Océanologie et Ressources Naturelles, Université Abdel Malek Essaâdi, Tanger, Maroc

Fire activity in West Mediterranean region particularly North-West Africa and its connections with past climatic changes still remains poorly documented. A new multiproxy analysis using mineralogy, geochemistry and microcharcoal data from Lake Ifrah (Middle Atlas, Morocco) provides new insights for better understanding fire occurrence

from the Last 13,000 cal yr BP.

Before 13,000 cal yr BP, the concentration in microcharcol was very low in connection with low fire activity and probably cold climate. Between 13,000 and 12,300 cal yr BP, there is increase in microcharcol in relation with the increase aridity. This period corresponds to the Bölling-alleröd period. Between 12,300 and 10,800 cal yr BP, there is a new decrease of the microcharcol corresponding to the Younger Dryas period. Between 10,800 and 4,500 cal yr BP, marked a significant increase in microcharcol abundance which likely testifies to regional emissions from forest fires. Such biomass burning events were associated to prolonged periods of drought. The maximum of dryness occurred ca 8,400 cal yr BP.

#### 5.4.23 (p) Reconstruction of data matching ice growth during the Eocene-Oligocene transition under influence of orbital parameters and atmospheric CO<sub>2</sub>

Jean-Baptiste Ladant<sup>1</sup>, Yannick Donnadiou<sup>1</sup>, Christophe Dumas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LSCE, Gif-sur-Yvette

L'apparition de la calotte Antarctique à la transition Eocène-Oligocène (34 Ma) marque le début de la Terre icehouse, marquée par la présence pérenne de glace au(x) pôle(s). De nombreux proxies ont en effet enregistré un refroidissement global du climat ainsi qu'une expansion glaciaire de forte amplitude en Antarctique. Des études de modélisation ont ainsi montré que la chute de la concentration en dioxyde de carbone atmosphérique en dessous d'un seuil de 750-800 ppm lors de la transition E-O avait conduit à l'englacement total du continent austral. Les reconstructions de δ18O et de niveau marin ont cependant montré que la glaciation s'était faite en deux étapes de 50 000 ans. Une première phase de refroidissement important associé à une augmentation modeste du volume de glace en Antarctique, puis, 200 000 ans plus tard, une deuxième phase marquée par une augmentation très importante du volume de glace.

En appliquant pour la première fois une méthode d'interpolation tridimensionnelle (prenant en compte l'orbite terrestre, le CO<sub>2</sub> et les rétroactions liées à la calotte de glace) à des états particuliers de climats, nous sommes capables de modéliser, en termes d'amplitude et de timing, les deux étapes de cette transition avec une très bonne corrélation par rapport aux données. Le refroidissement simulé correspond également à celui observé. De plus, la prise en compte, grâce à notre méthode d'interpolation, de rétroactions supplémentaires telles que la celle liée à l'albédo de la glace, nous permet de définir un seuil d'englacement total plus élevé (900 ppm vs 750-800 ppm) que les études précédentes. Ceci supporte l'hypothèse de calottes de glace de taille petite à moyenne durant l'Eocène moyen/tardif (50-35 Ma) sous des pressions partielles de CO<sub>2</sub> de l'ordre de 1000 ppm.

#### 5.4.24 (p) Millennial-scale variability of southern intermediate water penetration into the North Atlantic during the last 40 kyr

Quentin Dubois-Dauphin<sup>1</sup>, Christophe Colin<sup>1</sup>, Lucile Bonneau<sup>1</sup>, Jean-Carlos Montero-Serrano<sup>2</sup>, Dominique Blamart<sup>3</sup>, David Van Rooij<sup>4</sup>, Norbert Frank<sup>5</sup>

<sup>1</sup>GEOPS, Orsay

<sup>2</sup>Institut des sciences de la Mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec, Canada

<sup>3</sup>LSCE, Gif-sur-Yvette

<sup>4</sup>Renard Centre of Marine Geology, Department of Geology and Soil Science, Ghent University, Belgique

<sup>5</sup>Institute for Environmental Physics, Heidelberg, Allemagne

Throughout the last glacial-interglacial cycle major reorganizations of water masses in the North Atlantic occurred. Mediterranean Outflow Water (MOW) being an important source of saline and warm intermediate water has been modulated regarding its strength and mean depth. The Gulf of Cadiz near the Strait of Gibraltar is located in a region influenced by the three major temperate Atlantic mid-depth water masses : MOW, mid-depth subtropical gyre water and Antarctic Intermediate Water (AAIW). Those water masses are today characterized by contrasted Nd isotopic composition (εNd) : NACW εNd = -11.9 ; MOW εNd = -9.4 ; AAIW εNd = -6 to -7. Here, we have investigated εNd of seawater and cold-water corals (*L. pertusa*, *M. oculata* and *D. dianthus*) located to the Alboran Sea and to the SE of the Gulf of Cadiz (between 550 and 850 m) to constrain the present day seawater εNd and to reconstruct the past water mass mixing, i.e. MOW variability during the last 37 kyr. Seawater εNd values of -11.6 indicate that the NACW is today the predominant water mass at the position of the coral bearing sediment core MD08-3231. Coldwater coral fragments have been <sup>230</sup>Th/U dated yielding ages of 4.5 to 37 kyr. The coral εNd values range from -8 to -10.4 during the last 37 kyr, most likely indicating changes of the dominant water mass provenance. Glacial cold-water corals (from 19 to 37 kyr) are characterized by more radiogenic εNd values (> -9.5) compared to the ones from the Holocene demonstrating a decreasing contribution of MOW and/or AAIW in the SE Gulf of Cadiz during climate warming. Strikingly, Heinrich events H2 and H3 reveal even more radiogenic εNd values (-8). In addition, deep-sea corals from the Alboran Sea indicate that εNd of the MOW do not change significantly through time. These results imply a higher contribution of AAIW at 500 m depth in the eastern temperate Atlantic. This first coral based paleo-seawater εNd record for the Gulf of Cadiz thus points to significant advance of southern component water at shallow depth into the NE Atlantic.

## 5.5 Techniques de datation du Quaternaire : nucléides cosmogéniques, OSL, U/Th, magnétostratigraphie (transverse thème 1)

### (Quaternary dating methods : cosmogenic isotopes, OSL, U/Th, magnetostratigraphy)

#### Responsables :

- Pierre-Henri Blard (CRPG, Nancy)  
blard@crpg.cnrs-nancy.fr
- Yanni Gunnell (LGP, Lyon)  
Yanni.Gunnell@univ-lyon2.fr
- Regis Braucher (CEREGE, Aix en Provence)  
braucher@cerège.fr
- Julien Charreau (CRPG, Nancy)  
charreau@crpg.cnrs-nancy.fr
- Didier Bourlès (CEREGE, Aix en Provence)  
bourlescerege.fr

#### Résumé :

La datation des objets géomorphologiques du Quaternaire a significativement progressé au cours des 3 dernières décennies, en particulier grâce au développement des méthodes basées sur les nucléides cosmogéniques ( $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ ). En parallèle, d'autres méthodes de datation absolue comme l'OSL et les séries de l'uranium, ou relative, comme la magnétostratigraphie, ont aussi fait des progrès substantiels. Dans les cas favorables, l'association de ces méthodes permet aussi d'envisager de réduire significativement les incertitudes aléatoires et systématiques.

Cette session ouverte vise à accueillir (i) des contributions présentant les dernières avancées méthodologiques relatives aux nucléides cosmogéniques (techniques analytiques, calibration des taux de production, nouveaux modèles), à l'OSL, à l'U/Th ou à la magnétostratigraphie. (ii) Des cas d'études géomorphologiques sont également bienvenus, qu'il s'agisse d'applications relatives à la tectonique, à la mesure des taux d'érosion, à la paléoclimatologie (chronologies glaciaires) ainsi qu'à la géo-archéologie. Cette session sera aussi l'opportunité de discuter des verrous méthodologiques qui limitent encore le champ d'action de ces méthodes.

#### Abstract :

The dating of Quaternary geomorphological features has significantly improved over the past three decades, particularly through the development of methods based on cosmogenic nuclides ( $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ ). In parallel, other absolute dating methods such as OSL and uranium series, or relative dating methods such as magnetostratigraphy, have also made substantial progress. In favorable cases, the combination of these methods may lead to significant reduction of the random and systematic uncertainties that are inherent in each me-

thod when used on its own.

This session welcomes contributions presenting the latest methodological advances in cosmogenic nuclides (analytical techniques, calibration of production rates, new models), in OSL, U/Th or in magnetostratigraphy. Geomorphological case studies are also welcome and may involve applications to tectonics, the measurement of denudation rates, paleoclimatology (e.g. deglacial chronologies) and geoarchaeology. This session will also provide opportunities for discussing methodological difficulties that still limit the scope of these methods.

#### Mots clés :

Géochronologie, nucléides cosmogéniques, OSL, U/Th, magnétostratigraphie, géomorphologie, érosion, tectonique, paléoenvironnement, paléoclimat, archéo-géosciences

### 5.5.1 (o) Gestion des ambiguïtés et des incertitudes liées aux corrélations magnétostratigraphiques : implication pour la détermination des paléotaux de dénudation par les isotopes cosmogéniques

Julien Charreau<sup>1</sup>, Florent Lallier<sup>2</sup>, Christophe Antoine<sup>3</sup>, Guillaume Caumon<sup>1</sup>, Pierre-Henri Blard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

<sup>2</sup>GRC TOTAL, Aberdeen, Royaume-Uni

<sup>3</sup>GeoRessources, Nancy

La dénudation est un paramètre clé qui contrôle les interactions entre la tectonique et le climat. Il est donc important d'établir des bilans quantifiés de ce paramètre dans le passé. La mesure des isotopes cosmogéniques dans les sables de rivière permet de contraindre les taux de dénudation moyen sur l'ensemble d'un bassin versant. Son application à l'étude de sédiments de rivière anciens nécessite néanmoins de pouvoir contraindre de manière indépendante et précise les âges de dépôts et les taux de sédimentation afin de pouvoir corriger respectivement de la décroissance radioactive et de l'accumulation lors de l'enfouissement des sédiments.

La magnétostratigraphie représente ainsi un outil de datation puissant permettant d'apporter ces contraintes. Cependant, en l'absence de datation absolues indépendantes, les corrélations magnétostratigraphiques restent souvent mal contraintes car subjectives et définies uniquement sur la base de changements binaires (polarité inverse vs normales) et des épaisseurs correspondantes. Or l'épaisseur d'une polarité est fonction du taux de sédimentation qui peut ne pas être stationnaire et donc conduire à des ambiguïtés dans les corrélations proposées. Afin de mieux gérer ces ambiguïtés et les incertitudes qui y sont liées, nous avons mis au point une méthode numérique de corrélation à partir de l'algorithme de Dynamic Time Warping (DTW) et qui se base sur des règles explicites visant à minimiser les variations locales de taux de sédimentations. Cette approche permet ainsi de générer et visualiser rapidement un grand nombre de corrélations possibles et de mieux déterminer les incertitudes correspondantes, à la fois sur les âges et sur les taux de sédimentation qui en découlent.

### 5.5.2 (o) Variations séculaires du champ magnétique terrestre depuis 20 ky dans les sédiments des lacs des Alpes occidentales : perspectives de datation

Christian Cruzet<sup>1</sup>, Pierre Sabatier<sup>2</sup>, François Demory<sup>3</sup>, Bruno Wilhelm<sup>4</sup>, Nicolas Thouveny<sup>3</sup>, Elodie Jovet<sup>1,2</sup>, Anne-Lise Develle<sup>2</sup>, Anouk Leloup-Besson<sup>1,2</sup>, Fabien Arnaud<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Le Bourget du Lac

<sup>2</sup>EDYTEM, Le Bourget du Lac

<sup>3</sup>CEREGE, Aix en Provence

<sup>4</sup>University of Bern, Institute of Geological Sciences and Oeschger Centre for Climate Change Research, Bern, Suisse

Plusieurs lacs d'altitude des Alpes occidentales présentant différents contextes sédimentaires (dépôts fins parfois laminés jusqu'à des dépôts détritiques grossiers de types crues) et différentes lithologies dans leurs bassins versants (cristallins ou carbonatés) ont été carottés pour des études paléo-environnementales. En accompagnement, une étude paléomagnétique a été réalisée sur quelques lacs. Elle montre que les sédiments meubles récents peuvent porter une aimantation rémanente stable. L'étude des paramètres magnétiques indique que la magnétite de faible coercivité est le porteur de cette rémanence, quel que soit la nature du bassin versant.

Pour chaque lac, les variations de déclinaison sont utilisées pour corréler les séquences sédimentaires au modèle géomagnétique de référence, fournissant ainsi une estimation pour un modèle âge - profondeur. Ces estimations sont compatibles avec les radionucléides de courtes périodes, les datations 14C et les enregistrements d'événements historiques. Dans certains cas, avec un taux de sédimentation très faible, un retard dans l'acquisition de la rémanence (lock in depth effect) peut être mis en évidence et estimée à maximum 10-15 cm.

La séquence de 18,2 m du Lac de La Thuile a fait l'objet d'une étude particulière. Le modèle d'âge est établi à partir de 16 dates 14C, la plus vieille donne un âge de 16755 cal BP à 11,6 m de profondeur. Le début du remplissage sédimentaire est donc non daté. La base de la séquence, sur 50 cm, correspond à un diamicton interprété comme correspondant à la dernière moraine de fond locale. Les variations séculaires de La Thuile sont comparées à celles de la séquence du Lac du Bouchet et de Scandinavie et permettent d'estimer, avec prudence, l'âge du retrait glaciaire. Notre étude montre que les sédiments lacustres récents ou tardiglaciaire peuvent être datés par utilisation de l'enregistrement des variations séculaires du champ magnétique terrestre. Toutefois, le potentiel de cette méthode reste fortement dépendant de la qualité du carottage et de l'échantillonnage en U-Channel.

### 5.5.3 (o) Contrainte temporelle d'un système fluvial à l'initiation du rift de Corinthe (Grèce) par magnétostratigraphie et âges d'enfouissement 26Al/10Be

Romain Hemelsdaël<sup>1</sup>, Mary Ford<sup>1</sup>, Fabrice Malartre<sup>2</sup>, Julien Charreau<sup>1</sup>, Pierre-Henri Blard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

<sup>2</sup>GeoRessources, Nancy

Le long de la marge sud du rift de Corinthe, le soulèvement des épaules du rift permet l'exposition des dépôts fluviaux, deltaïques et lacustres accommodant le jeu des failles normales à l'initiation du rift. Les corrélations stratigraphiques entre les blocs de failles normales sont nécessaires et révèlent la nature des changements latéraux de faciès dans les rifts continentaux. L'initiation du rift de Corinthe est peu documentée, aussi bien en termes d'âge (environ 5 Ma), que de remplissage sédimentaire syn-rift, de provenance des sédiments et de structuration du bassin. Les travaux présentés cherchent à contraindre en temps et en espace le comportement des rivières en lien avec la croissance des failles normales, la formation des dépocentres depuis l'initiation rifting. L'exercice de corrélation au sein des dépôts alluviaux et fluviaux nécessite des contraintes temporelles difficiles à déterminer. Les corrélations lithostratigraphiques dans les systèmes fluviaux sont fortement limitées par la forte variabilité latérale des faciès. Dans le rift de Corinthe, la rareté des marqueurs biostratigraphiques encourage ici l'utilisation de la magnétostratigraphie. Cette dernière ne pouvant être utilisée comme technique seule, les rares inversions de polarité enregistrées au Plio-Quaternaire sont contraintes par les âges d'enfouissement à partir des isotopes cosmogéniques 26Al/10Be sur quartz. Des données palynologiques et la détermination de micromammifères permettent aussi de caler en temps les dépôts syn-rift dans différents blocs de failles normales.

Aux observations et aux décisions prises sur le terrain, sont ajoutées 4 logs magnétostratigraphiques et une quinzaine d'âges d'enfouissement. Le calage temporel de ces dépôts syn-rift permet de développer un modèle des relations tectono-sédimentaires entre système fluvial et croissance d'un réseau de failles normales. La détermination de taux de processus sédimentaires en réponse à la tectonique extensive est originale dans le rift de Corinthe. Le couplage des techniques de datation permet de discuter les incertitudes liées à la détermination d'âges et les implications sur les corrélations stratigraphiques.

### 5.5.4 (o) Quantification par les nucléides cosmogéniques produits in situ du développement des cirques glaciaires pyrénéens

Yannick Crest<sup>1</sup>, Marc Calvet<sup>1</sup>, Magali Delmas<sup>1</sup>, Yanni Gunnell<sup>2</sup>, Régis Braucher<sup>3</sup>, Didier Bourlès<sup>3</sup>

<sup>1</sup>HNHP, Perpignan

<sup>2</sup>EVS, Lyon

<sup>3</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

La production du relief par les glaciers est un thème essentiel dans la géodynamique des montagnes. La littérature insiste tantôt sur l'exagération du relief préglaciaire par les grands glaciers de vallée, tantôt sur l'intensité de l'érosion au niveau de la ligne d'équilibre des glaces et au-dessus (théorie du "buzzsaw"). Sur le long terme, ce buzzsaw limiterait la surrection des sommets et conduirait à établir un équilibre dynamique entre soulèvement crustal et dénudation. Une gamme de processus variés, glaciaires, périglaciaires et paraglaciaires contribue potentiellement à ce résultat. L'évolution des cirques résulte, quant à elle, de la combinaison de deux types de mécanismes d'intensités variables : un approfondissement par creusement glaciaire et un élargissement par recul des parois.

Ces hypothèses ont été testées dans deux massifs granitiques pyrénéens situés au cœur de la Zone axiale, fortement marqués par l'empreinte glaciaire et réduits à un système de crêtes de recoupement par le développement des cirques : le massif de Bassiès, déglacé depuis la fin du Dryas récent, et le massif de l'Aneto, qui comporte des glaciers résiduels encore actifs au Petit Age de Glace (PAG). Trois transects ont été établis du plancher aux crêtes dans des cirques de Bassiès, de la Maladetta et de l'Aneto, et la concentration en nucléides <sup>10</sup>Be et <sup>26</sup>Al produits in situ y a été mesurée dans des surfaces rocheuses polies par la glace et dans des crêtes rocheuses supra-glaciaires. On montre que (i) l'âge des crêtes est considérablement plus ancien (25-60 ka) que celui des planchers rocheux (5-11 ka), ce qui implique une relative faiblesse de l'érosion des sommets en contradiction avec la théorie du buzzsaw ; (ii) les planchers rocheux dans le massif de l'Aneto conservent des héritages antérieurs au PAG et même antérieurs au dernier maximum glaciaire würmien, ce qui démontre la relative faiblesse de l'érosion glaciaire dans les massifs pourtant les plus longtemps englacés des Pyrénées.

### 5.5.5 (o) Datation d'alluvions par les nucléides cosmogéniques, forçages climatiques et variations sur 200 ka des styles fluviaux sur le piémont nord-pyrénéen

Magali Delmas<sup>1</sup>, Régis Braucher<sup>2</sup>, Valéry Guillou<sup>2</sup>, Marc Calvet<sup>1</sup>, Yanni Gunnell<sup>3</sup>, Didier Bourlès<sup>2</sup>

<sup>1</sup>HNHP, Perpignan

<sup>2</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>3</sup>EVS, Lyon

Les terrasses étagées enregistrent les variations à long terme du style fluvial en réponse aux changements climatiques quaternaires et en phase avec les mouvements verticaux de la croûte terrestre. Elles permettent de reconstituer le profil d'équilibre des paléo-écoulements et offrent à ce titre un marqueur efficace pour quantifier la vitesse d'incision des vallées. Par ailleurs, l'opportunité de mieux dater les séquences fluviales a permis de préciser les moteurs de la dynamique alluviale. Cependant, l'essentiel des acquis concerne les environnements périglaciaires et ne s'applique que partiellement aux contextes fluvioglaciaires où la dynamique alluviale est fortement contrainte par la dynamique des langues de glace. L'objectif de la communication est de présenter les données

cosmogéniques acquises le long de 5 profils verticaux sur les nappes fluvioglaciaires du bassin de l'Ariège. Les profils comptent 10 à 12 échantillons, amalgamant graviers et petits galets de 3 à 5 cm de grand axe au maximum, prélevés sur 3 à 20 m de profondeur selon les profils. Ces données soulignent le rôle des crises érosives paraglaciaires caractéristiques des périodes de déglaciation en matière d'aggradation des nappes. Elles soulignent aussi le rôle des transitions climatiques cold to warm en matière d'incision. Enfin, ces données renouvellent totalement la stratigraphie des dépôts quaternaires précédemment établie pour le piémont nord-pyrénéen sur la base de critères exclusivement relatifs et basés sur l'état d'altération des dépôts et sur des chrono-séquences de sols développées à leur toit. Elles permettent à ce titre de préciser la vitesse d'altération des dépôts alluviaux au cours des derniers 200 ka mais aussi l'ampleur du soulèvement vertical de ce piémont montagneux pour cette même plage de temps.

### 5.5.6 (o) Calibration of cosmogenic <sup>3</sup>He and <sup>10</sup>Be production rates in the High Tropics

Pierre-Henri Blard<sup>1</sup>, Jérôme Lavé<sup>1</sup>, Léo Martin<sup>1</sup>, Julien Charreau<sup>1</sup>, Didier Bourlès<sup>2</sup>, Régis Braucher<sup>2</sup>, Thomas Condom<sup>3</sup>, Maarten Lupker<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

<sup>2</sup>CEREGE, Aix en Provence

<sup>3</sup>LTHE-LGGE, Grenoble

<sup>4</sup>ETH Zurich, Suisse

It is critical to refine both the accuracy and the precision of the in situ cosmogenic dating tool, especially for establishing reliable glacial chronologies that can be compared to other paleoclimatic records. Recent cross-calibrations of cosmogenic <sup>3</sup>He in pyroxene and <sup>10</sup>Be in quartz [1, 2] showed that, both at low (1300 m) and high elevation (4850 m), the <sup>3</sup>He/<sup>10</sup>Be production ratio was probably ~40% higher than the value of ~23 initially defined in the 90's. This recent update is consistent with the last independent determinations of the sea level high latitude-production rates of <sup>10</sup>Be and <sup>3</sup>He, that are about 4 and 125 at.g-1.yr-1, respectively [e.g. 3, 4]. However, major questions remain about these production rates at high elevation, notably because existing calibration sites for both <sup>3</sup>He and <sup>10</sup>Be are scarce above 2000 m.

Here we report cosmogenic <sup>10</sup>Be data from boulders sampled on a glacial fan located in the Central Altiplano in Bolivia (3800 m), which is independently dated by stratigraphic correlations and radiocarbon at ca. 16 ka. These data can be used to calibrate the production rate of <sup>10</sup>Be at high elevation, in the Tropics. After scaling to sea level and high latitude, these data yield a sea level high latitude P10 ranging from 3.8 to 4.2 at.g-1.yr-1, depending on the used scaling scheme.

These new calibration data are in good agreement with recent absolute and cross-calibration of <sup>3</sup>He in pyroxenes and <sup>10</sup>Be in quartz, from dacitic moraines located at 4820 m in the Southern Altiplano (22°S) [2,5]. The so-obtained <sup>3</sup>He/<sup>10</sup>Be production ratio of 33.3±0.9 (1s) combined with an absolute <sup>3</sup>He production rate locally calibrated in the Central Altiplano, at 3800 m, indeed yielded a sea level high latitude P10 ranging from 3.7±0.2 to 4.1±0.2 at.g-1.yr-1, depending on the scaling scheme [2,5]. These values are also consistent with the <sup>10</sup>Be production rate recently calibrated in Peru, 1000 km north from the bolivian sites [6].

[1] Amidon et al. (2009) Earth Planet. Sci. Lett. 280, 194-204.

[2] Blard et al., (2013) Earth Planet. Sci. Lett. 382, 140-149.

[3] Putnam et al. (2010) Quat. Geochron. 5, 392-409.

[4] Goehring et al. (2010) Quat. Geochron. 5, 410-418.

[5] Blard et al., (2013) Earth Planet. Sci. Lett. 377-378, 260-275.

[6] Kelly et al. (in press) Quat. Geochron.

### 5.5.7 (p) Datations par les nucléides cosmogéniques de l'abandon de réseaux karstiques et rythmes de l'incision des vallées dans les Pyrénées : implications géodynamiques

Marc Calvet<sup>1</sup>, Yanni Gunnell<sup>2</sup>, Magali Delmas<sup>1</sup>, Régis Braucher<sup>3</sup>, Didier Bourlès<sup>3</sup>, Pierre-Henri Blard<sup>4</sup>, Patrick Sorriaux<sup>5</sup>, Gabriel Hez<sup>6</sup>, Audry Bourdet<sup>7</sup>

<sup>1</sup>HNHP, Perpignan

<sup>2</sup>EVS, Lyon

<sup>3</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>4</sup>CRPG, Nancy

<sup>5</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>6</sup>EDYTEM, Le Bourget du Lac

<sup>7</sup>MNHN, Paris

Le soulèvement des chaînes actives contrôle l'incision des vallées fluviales, laquelle est à son tour modulée par les changements climatiques quaternaires. Bien que présentant des indices de néotectonique quaternaire et une sismicité non négligeable, les Pyrénées ne sont pas considérées comme une chaîne active. On propose ici une quantification des taux d'incision plio-quaternaires à partir de galeries karstiques étagées contenant des dépôts alluviaux allogènes. Les galeries épiphréatiques, recoupées par les vallées, fournissent un marqueur fiable des anciens niveaux de base locaux, où la durée d'enfouissement de matériaux siliceux issus des amonts et piégés dans les chaînons calcaires périphériques, peut être déterminée par la mesure du rapport  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ .

Deux vallées raccordées à deux niveaux de base différents sont comparées. En Ariège (exutoire : Atlantique), le synclinal de Tarascon renferme des galeries étagées entre 1100 et 500 m d'altitude. Le réseau de Lombrives (+160 m) est daté du Pliocène moyen (incision :  $\sim 50$  m Ma<sup>-1</sup>). Cette vitesse s'accroît au Quaternaire (300 m Ma<sup>-1</sup> depuis 200 ka) d'après les âges obtenus sur terrasses fluviales. Pour la Têt (exutoire : Méditerranée), le synclinal de Villefranche fournit un site idéal dans une gorge épigénique à 12 km du Pliocène marin qui remblaie la ria messinienne du Roussillon. Le karst comporte 9 étages, dont deux datés (+270 et +100 m). Les résultats montrent un creusement continu pendant tout le Plio-quaternaire, sans signal d'un surcreusement attribuable à la crise de salinité messinienne. Les taux d'incision depuis le début du Pliocène sont comparables à l'Ariège (56 m Ma<sup>-1</sup>), mais s'accroissent après le Quaternaire ancien (10<sup>3</sup> m Ma<sup>-1</sup>). Les taux d'incision pyrénéens se situent dans la médiane des valeurs obtenues pour d'autres montagnes en contexte non englacé, suggérant indirectement la modestie de la contribution glaciaire à la dénudation des Pyrénées malgré l'emprise assez étendue du domaine englacé.

### 5.5.8 (p) Paleomagnetic stability in Quaternary terraces; a case study in the Ebro River (NE Spain)

Héctor Gil Garbí<sup>1</sup>, Emilio L. Pueyo<sup>2</sup>, María Asunción Soriano<sup>1</sup>, Aránzazu Luzón<sup>1</sup>, Antonio Pérez<sup>1</sup>, Andrés Pocoví Juan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Zaragoza, Espagne

<sup>2</sup>Instituto Geológico y Minero de España, Zaragoza, Espagne

Paleomagnetism studies the changes of the Earth's magnetic field recorded by rocks and sediments since some ferromagnetic minerals may have the ability to lock-in ancient fields for long lasting periods. Several magnetic reversals occurred within the Pleistocene, particularly before the Brunhes/Matuyama boundary (0,781 Ma), therefore, paleomagnetism is very useful for dating Quaternary fluvial deposits because this time lapse exceeds other dating techniques (OSL or <sup>14</sup>C) that cannot be applied. In addition, these deposits are discontinuous records because

they are formed by the succession of aggradational and erosional stages and only the aggradational ones have been partially preserved.

With this purpose, we have performed a paleomagnetic study in different terrace levels in the Ebro River near Zaragoza (NE Spain). Previous data in the Ebro Basin found reverse polarities in the uppermost levels that were interpreted as corresponding to Matuyama. However, we have also found unexpected and inconsistent results at similar terraces. « Paleomagnetism is not a simple game » (Scotese 1998). To solve these problems, we have carefully studied the magnetic mineralogy of prospected materials because sometimes can provide crucial information about the stability of the characteristic remanent magnetization.

Besides, in the central Ebro Basin, the terrace materials are located over evaporitic substratum and this has favoured the occurrence of karstic deformations; collapses, passive folding, tilting and even intraformational breccias affecting the Quaternary sedimentary levels. These exceptional deposits allow us to apply classic paleomagnetic stability test; fold, conglomerate and reversal test. Our results suggest that delays in the acquisition of the magnetic polarity of the sediments may occur. This delay may even change the age model for the terrace sequence and therefore, paleomagnetic data have to be used with caution.

### 5.5.9 (p) Calibration of the Cl-36 production rate from K-spallation in the European Alps (Chironico landslide, Switzerland)

Irene Schimmelpfennig<sup>1,2</sup>, Joerg Schaefer<sup>2</sup>, Aaron Putnam<sup>2</sup>, Toby Koffman<sup>2</sup>, Lucilla Benedetti<sup>1</sup>, Susan Ivy-Ochs<sup>2</sup>, Aster Team<sup>1</sup>, Christian Schlüchter<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>LDEO, Columbia University, Palisades, New York, États-Unis

<sup>3</sup>Institut für Teilchenphysik, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, Suisse

<sup>4</sup>Institute of Geological Sciences (University of Bern), Suisse

The abundant production of in situ cosmogenic Cl-36 from potassium renders Cl-36 measurements in K-rich rocks or minerals, such as K-feldspars, potentially useful for precisely dating rock surfaces, either in single-nuclide or multi-nuclide studies, e.g. combined with Be-10 measurements in quartz. However, significant discrepancies in experimentally calibrated Cl-36 production rates from spallation of potassium (P36\_K-sp), referenced to sea-level/high-latitude (SLHL), limit the accuracy of Cl-36 dating from K-rich lithologies. We present a new Cl-36 calibration using K-feldspars, in which K-spallation is the most dominant Cl-36 production pathway (>92% of total Cl-36), thus minimizing uncertainties from the complex multi-pathway Cl-36 production systematics. The samples are derived from boulders deposited by a prominent landslide near Chironico in the Ticino River valley, South-Central Swiss Alps (~820 m, 46.43°N, 8.85°E). The landslide event is dated by C-14 ages from organic material found at the base of a lacustrine sediment sequence in direct geomorphic relation with the landslide debris (Antognini and Volpers, Bull. Appl. Geol. 7, 113-125, 2002), resulting in a calendrial deposition age of  $\sim 13.4$  ka.

We obtain a local P36\_K-sp of  $306 \pm 16$  atoms Cl-36/[(g K) a] and a SLHL P36\_K-sp of  $145.5 \pm 7.7$  atoms Cl-36/[(g K) a], when scaled with a standard scaling protocol (« Lm »). This SLHL P36\_K-sp is in agreement with SLHL P36\_K-sp values obtained by Marrero (PhD thesis, 2012) ( $157 \pm 6$  atoms Cl-36/[(g K) a]) and Evans et al. (Meth. Phys. Res. Sect. B 123, 334-340, 1997) ( $170 \pm 25$  atoms Cl-36/[(g K) a]), both derived from K-feldspars. Applying our new SLHL P36\_K-sp to determine Cl-36 exposure ages of K-feldspars from Be-10-dated moraine boulders (Schimmelpfennig et al., Geology 40, 891-894, 2012) yields excellent agreement, confirming the validity of the new SLHL

P36\_K-sp for surface exposure studies, involving Cl-36 in K-feldspars,  
in the Alps.

## 5.6 Les biomarqueurs moléculaires comme proxys biogéochimiques, (paléo)environnementaux et (paléo)climatiques (transverse thème 8)

### (Molecular biomarkers as biogeochemical, (paleo)environmental and (paleo) climatic proxies)

conditions under which it was biosynthesized, deposited and preserved, its modes and rates of degradation (e.g., for reconstruction of trophic chains), potential impact on the environment (e.g., organic pollutants), transfer through modern and ancient ecosystems, etc. This session at the interface of themes (5) and (8) will focus on recent progress in the characterization and use of organic biomarkers, including their isotopic composition ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ , D/H, etc.), to study biogeochemical processes, the functioning of (recent and past) aquatic and terrestrial ecosystems, and to reconstruct (paleo)environmental, (paleo)climatic and (paleo)societal conditions. In addition to new case studies, contributions related to the specificity, calibration or limitations of « proxies » based on organic biomarkers are encouraged.

#### Responsables :

- Vincent Grossi (LGLTPE, Lyon)  
vincent.grossi@univ-lyon1.fr
- Matthew Makou (LGLTPE, Lyon)  
matthew.makou@univ-lyon1.fr
- Muriel Pacton (LGLTPE, Lyon)  
mupact@hotmail.com

#### Keywords :

organic biomarkers, environmental proxies, biogeochemical processes, organic pollutants, Present and Past ecosystems, paleoclimates

#### Résumé :

Certains constituants de la matière organique (MO), appelés « biomarqueurs organiques », possèdent une spécificité et une stabilité qui permettent de les utiliser comme « empreintes moléculaires » sur diverses échelles de temps. L'analyse de ces composés ou de leurs produits de transformation dans diverses matrices environnementales (eau, sédiments, sols, etc.) permet entre autre de définir l'origine de la MO présente dans ces échantillons, les conditions environnementales/climatiques/sociétales dans lesquelles elle a été biosynthétisée, apportée ou préservée, ses modes et ses vitesses de transformation (e.g., reconstitution des chaînes trophiques), son impact éventuel sur l'environnement (e.g., pollutions organiques), son transfert dans les écosystèmes modernes et anciens, etc.

Cette session, à l'intersection des thèmes (5) et (8), s'intéressera aux avancées faites ces dernières années sur la caractérisation et l'utilisation des biomarqueurs organiques, et de leur composition isotopique ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ , D/H, etc.), pour notamment étudier certains processus biogéochimiques et le fonctionnement d'écosystèmes aquatiques et terrestres actuels ou anciens, et pour les reconstructions (paléo)environnementales, (paléo)climatiques et (paléo)sociétales.

En plus de nouveaux cas d'études, les contributions concernant la spécificité, la calibration et les limites d'utilisation de « proxys » basés sur les biomarqueurs organiques seront sollicitées.

#### Mots-clés :

Biomarqueurs organiques, proxys environnementaux, processus biogéochimiques, polluants organiques, écosystèmes actuels et anciens, paléoclimats

#### Abstract :

Some constituents of organic matter (OM), known as « organic biomarkers » exhibit an enhanced specificity and stability that promote their use over various time scales as « molecular fingerprints ». Analysis of these compounds, or their diagenetic products, in various environmental matrices (water, sediment, soil, etc.) allows one to infer the origin of the OM present in samples, the environmental/climatic/societal

### 5.6.1 *Keynote communication* : Botanique et molécules, ou les biomarqueurs de plantes terrestres en géosciences

Armelle Riboulleau<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosystèmes, Lille

Depuis leur apparition au Paléozoïque inférieur, les plantes terrestres se sont dotées d'une grande variété de molécules spécifiques leur permettant de surmonter les difficultés de la vie à l'air libre. Après enfouissement, ces molécules sont modifiées par des processus diagénétiques ou catagénétiques. Les produits de ces transformations se retrouvent dans les sédiments, roches sédimentaires, charbons ou pétroles et sont qualifiés de « biomarqueurs de plantes terrestres ». Alors que les biomolécules synthétisées par les plantes sont étudiées de longue date pour leur parfum ou leurs propriétés pharmacologiques, les biomarqueurs de plantes terrestres suscitent de plus en plus d'intérêt en géosciences s.l. pour leurs nombreuses applications. Cette présentation passera en revue la variété des biomarqueurs de plantes terrestres et présentera diverses applications, allant de l'industrie pétrolière jusqu'aux applications paléoenvironnementales en passant par la paléobotanique ou l'archéologie.

### 5.6.2 (o) L'événement anoxique d'âge Albien à Koudiat Berkouchia et Jebel Ghazouane (région de Nebeur; Tunisie septentrionale) : apport de l'étude des biomarqueurs

Hassene Affouri<sup>1</sup>, Zina Khalifa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géoresources, Matériaux, Environnement et Changements Globaux, Faculté des Sciences de Sfax, Sfax, Tunisie

En Tunisie septentrionale, les dépôts d'âge Albien, correspondant à la base de la Formation Fahdène (Albien-Cénomaniens) sont représentés par des calcaires et marno-calcaires riches en matière organique.

Dans cette étude, des analyses sédimentologiques et organogéochimiques ont été effectuées sur des échantillons provenant de deux coupes « Koudiat Berkouchia » et « Jebel Ghazouane » dans la région de Nebeur en Tunisie du Nord Ouest. L'objectif était d'étudier la richesse des faciès en matière organique et la caractérisation de leur signature moléculaire (Biomarqueurs) en relation avec l'événement anoxique global « OAE1b » d'âge Albien.

Les résultats de l'étude sédimentologique montrent qu'il s'agit de faciès mudstone à wackstone finement laminés riches en radiolaires et montrant des microfractures diagénétiques remplies par du bitume. Ces caractéristiques dénotent d'un environnement calme, stagnant et eutrophique à forte productivité dans la tranche d'eau de surface. La richesse en matière organique de ces faciès montre que les teneurs les plus élevées coïncident avec le « Vraconien » et correspondent bien à l'événement anoxique global « OAE1b ». Les résultats des analyses par la pyrolyse Rock-Eval et la distribution des n-alcane montrent qu'il s'agit d'une matière organique d'origine marine planctonique et/ou algale de type II avec contribution bactérienne et mature du point de vue pétrolier. Cette matière organique est très pourvue en marqueurs biologiques ou biomarqueurs de la famille des stéranes et des terpanes. Ces derniers ont été utilisés pour l'évaluation du degré d'évolution de la maturité thermique ainsi que pour la reconstruction de l'origine et des environnements de dépôts de la matière organique.

La distribution des biomarqueurs dans deux échantillons représentatifs pris de ces deux coupes montrent, une abondance des terpanes tricycliques et une bonne conservation des C34-C35 homohopanes. Ces signatures sont caractéristiques, respectivement, d'une forte contribution bactérienne au stock organique et d'un environnement extrêmement

anoxique. La série des stéranes, dominée par les composés en C27 issues du cholestérol planctonique ou algale au dépend de leurs homologues en C29 et C28, dénote d'une origine marine planctonique exclusive de cette matière organique.

### 5.6.3 (o) Evolution of agropastoralism around Lake Igaliku (Southern Greenland) during the last two millenia through molecular biomarkers

Typhaine Guillemot<sup>1</sup>, Jérémy Jacob<sup>2</sup>, Renata Zocatelli<sup>2</sup>, Vincent Bichet<sup>1</sup>, Emilie Gauthier<sup>1</sup>, Charly Massa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Chrono-environnement, Besançon  
<sup>2</sup>ISTO, Orléans

During the last two millennia, global climate warming events allowed two phases of agricultural expansion in South Greenland. The first phase coincided with the medieval Norse colonization between 986 AD and the mid-fifteenth century; the second, corresponds to the modern reestablishment of farmers since 1920, at the very end of the Little Ice Age. This context appears as an exceptional study model to examine the transition from a pristine to an anthropogenic landscape. In order to assess the history and impacts of grazing activities on the environment, a first molecular inventory was conducted on a well-dated sedimentary sequence retrieved from Lake Igaliku.

It was confronted to pollen, non pollen palynomorph and elements, allowing us discussing the evolution of agropastoralism and its impacts on the local ecosystems. Fecal sterols and bile acids can help identifying the former presence of Humans and their livestock. In our case, only deoxycholic acid (DCA) is detected with high fluxes recorded during the two phases of agricultural expansion, coincident with high percentages of coprophilous spores. DCA is produced by all herbivores but, because it is the unique bile acid found in Igaliku sediments, we propose that it mainly derives from sheep. Thus, it could be possible to distinguish predominant livestock species raised in the catchment of Igaliku during the two phases of settlements.

Sheep breeding induce an increase in trimethyl tetra hydro chrysenes (TTHC) and in Ti, considered as tracers of soil erosion during the last centuries. It is accompanied by an increase in n-C17 alkane fluxes and mesotrophic diatoms percentages that attest to an eutrophication of the lake waters in recent times. During the last centuries as well as the medieval period, sheep breeding has also involved a change in vegetation, pointed by low percentages of trees and shrubs pollens associated with an increase of the average chain length of n-alkanes and in triterpenyl acetates fluxes, molecular biomarkers of an open area.

The combined analysis of molecular biomarkers and pollen allows tracing the compared evolution of farming activities during the two major phases of anthropisation and providing a new insight into the Norse history in Greenland.

### 5.6.4 (o) Temperature record and sapropel formation during the late Pliocene in central Mediterranean : a multi-proxy approach

Julien Plancq<sup>1,2</sup>, Vincent Grossi<sup>1</sup>, Carme Huguet<sup>3</sup>, Bernard Pittet<sup>1</sup>, Antoni Rosell-Melé<sup>3</sup>, Emanuela Mattioli<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LGLTPE, Lyon

<sup>2</sup>LMOC, Caen

<sup>3</sup>Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals, Barcelona, Espagne

The late Pliocene (3.6-2.6 Myr) in the Mediterranean region is characterized by the deposition of dark, organic matter-rich layers named sapropels. The causes of their formation remain a long standing debate

in the science community, and require disentangling the roles of climatic/oceanographic processes that triggered enhanced primary productivity and/or improved organic matter preservation.

Here, we used a multi-proxy approach to characterize long-term environmental conditions and to discuss sapropel formation during the late Pliocene at Punta Grande/Punta Piccola sections (southwest Sicily). Sea and air temperatures were reconstructed using all the lipid biomarker-based temperature proxies currently available : the alkenone unsaturation index (UK'37), the tetraether index (TEX86), the Long-chain Diol Index (LDI), and the degree of methylation/cyclization of branched tetraether (MBT/CBT). Results show that sea-surface temperatures (SSTs) were relatively stable throughout the late Pliocene, but that consistent increases are recorded in most sapropel layers, suggesting warmer conditions during their formation. We also reveal a coupling between continental temperatures and aquatic ones after 3.1 Ma. SST record was then compared with variations in total organic carbon proportions, lipid biomarkers contents and nannofossil assemblages. Two mechanisms of formation can be inferred for each sapropel. A first series of sapropels, deposited between 3.1 and 2.8 Ma under overall oligotrophic sea-surface conditions, is likely due to a better preservation of organic matter, subsequent to the development of an effective thermohaline stratification of the water column and to oxygen depleted bottom waters. The second series of sapropels, rather formed under mesoeutrophic conditions between 2.8 and 2.6 Ma, is more likely due to enhanced primary productivity in a weak stratified water column.

### 5.6.5 (o) Lability and fate of terrigenous organic matter on a Mediterranean river-dominated margin : A biomarker study

Audrey Pruski<sup>1</sup>, Solveig Bourgeois<sup>2</sup>, Ming Yi Sun<sup>3</sup>, Roselyne Buscaïl<sup>4</sup>, Philippe Kerhervé<sup>4</sup>, Gilles Vétion<sup>1</sup>, Christophe Rabouille<sup>5</sup>

<sup>1</sup>LECOB, Banyuls sur mer

<sup>2</sup>University of Aberdeen, Royaume-Uni

<sup>3</sup>The University of Georgia, Athens, États-Unis

<sup>4</sup>CEFREM, Perpignan

<sup>5</sup>LSCE, Gif-sur-Yvette

Major rivers bring to deltaic environments high loads of continental particulate organic matter (OM) whose impact on the biogeochemistry and productivity of coastal sediments largely depends on the sources and lability of these inputs. Land-derived OM is considered to be relatively refractory to decomposition due to the presence of lignin structures. Yet, the river biogenic inputs to coastal waters are from a wide variety of allochthonous sources that differ in their specific reactivities. As one of the four largest depositional centers in the Mediterranean sea, the Rhône deltaic-shelf region in southern France represents a type environment to study the biogeochemical fate of river borne biogenic inputs in modern deltaic systems. Sediment cores were collected from the Rhône prodelta and its adjacent shelf during a period of moderate river discharge and during a flood event. Biochemical proxies of OM quality and diagenesis (total and enzymatically hydrolysable amino acids) were used in conjunction with biomarkers of origin (bulk isotopic signature of the OM, fatty acids and their carbon isotopic signatures) to gain insights into the reactivity of riverine inputs in the Rhône prodelta and to delineate the parameters controlling their fate in these dynamic systems. Our results show that far from the general eutrophication issue caused by large rivers, the Rhône River delivers a recent, relatively labile, and biodegradable source of particulate organic matter which fertilizes the otherwise oligotrophic seafloor and is efficiently remineralized in the sediments. However, on an inter annual time-scale, river runoff variability (e.g. floods) and meteorological conditions (e.g. winter storms) which affect the deposition, remobilization and export of terrigenous POC on the Rhône

delta-shelf system are key factors controlling the fate of biogenic inputs in these high-energy environments.

### 5.6.6 (o) Multi-proxy record of past environmental changes from a tropical peatland (Kyambangunguru, Tanzania)

Sarah Coffinet<sup>1</sup>, Arnaud Huguet<sup>1</sup>, Christelle Anquetil<sup>1</sup>, David Williamson<sup>2</sup>, Laurent Bergonzini<sup>3</sup>, Amos Majule<sup>4</sup>, Sylvie Derenne<sup>1</sup>

<sup>1</sup>METIS, Paris

<sup>2</sup>LOCEAN Paris

<sup>3</sup>IDES, Orsay

<sup>4</sup>University of Dar Es Salaam, Dar es Salaam, Tanzanie

Tropics are key components of the atmospheric circulation partly responsible for the variations of climatic conditions, as they are a major source of heat and water vapor on Earth (Garcin et al., 2006). Thus, by improving our knowledge on past climate variations in these areas, notably in terms of temperature fluctuations and hydrological regimes, we may be able to better constrain the driving forces of climate regulation. However, paleostudies in soils are difficult because of their heterogeneity. In contrast, peat bogs have a great potential of accumulation and preservation of organic matter due to their physical and chemical conditions and therefore appear as ideal settings for the application of organic proxies.

The Kyambangunguru site (SW Tanzania ; 663 m asl) is a former Maar lake system being filled up by ombrotrophic peat. The evolution from a lake to a peat bog is a frequent phenomenon in Maar lakes of this region but its environmental causes remain unclear. In order to track when and why this conversion occurred, a 4 m core covering ca. 4,000 years BP (based on 14C dating) was collected in the middle of the Kyambangunguru peat bog. A multi-proxy approach involving elemental, molecular (GDGTs, n-alkanes), isotopic ( $\delta$  D) as well as microscopic (macrorests, micro-fossils, palynofacies, testate amoebae) analyses was applied along this core. The combination of the different proxies gave us complementary insights into the climate and vegetation changes along the core. Results of n-alkanes, GDGTs and elemental analyses all showed a clear shift between 1,590 and 2,215 years BP, likely corresponding to an ecosystem change from a lake to a peat bog. Notably, at this depth, the high C/N values indicates a low decomposition of the organic matter while the GDGTs derived proxies show more acidic and warmer climatic conditions.

References :

Garcin, Y. et al. (2006), Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 239, pp. 334-354

### 5.6.7 (o) Diversité et évolution des biomarqueurs moléculaires dans les sédiments du Maar de Menat (Paléocène)

Alexandre Thibault<sup>1</sup>, Jérémy Jacob<sup>1</sup>, Claude Lemilbeau<sup>1</sup>, Florence Quesnel<sup>1,2</sup>, Nicolas Bossard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

Nous avons étudié la distribution et l'évolution des biomarqueurs moléculaires dans les sédiments du Lac de Maar de Menat (Massif Central), site paléontologique du Paléocène (51-64 Ma), réputé, entre autres, pour la qualité de préservation de la flore (feuilles et fleurs). Nous avons prélevé 12 échantillons (selon un pas de 4 m) provenant d'un forage de 50m réalisé par le BRGM en 2008. Ces échantillons ont été analysés par pyrolyse Rock-Eval puis les biomarqueurs lipidiques ont été extraits, séparés sur mini-colonnes et identifiés et quantifiés par CPG-SM.

Les sédiments se sont révélés très riches en matière organique (MO), avec des COT entre 15 et 30%. La faible maturité thermique des MOs attestée par un Tmax inférieur à 440°C. Les valeurs d'IH et d'IO témoigneraient a priori d'un mélange de MOs provenant d'algues et de végétaux vasculaires terrestres. Toutefois, ces valeurs sont très semblables à celles mesurées dans le Maar d'Enspel pour lequel des IH élevés ont été attribués à une forte contribution de cires de feuilles. Les n-alcane ne permettent pas de trancher la source de MO bien que leur distribution soit dominée par des homologues à longue chaîne mais avec une CPI faible. A l'inverse, les cétones à longue chaîne affichent des CPI élevées, indiquant leur bonne préservation. De nombreux triterpènes pentacycliques de végétaux supérieurs ont pu être identifiés. En particulier le sédiment contient des dérivés diagénétiques variés tels que des des-A-arborènes et des-A-fernènes, des des-A-monoaromatiques, des des-A-triaromatiques, et des triterpènes pentacycliques mono-, tri-, tétra- et penta-aromatiques. Ce cortège confirme la une forte contribution des végétaux vasculaires au sédiment. L'évolution comparée de ces biomarqueurs permet de distinguer différents faciès moléculaires qui semblent témoigner de changements majeurs des conditions physico-chimiques qui régnaient dans le lac et dans son bassin versant.

### 5.6.8 (o) Evidence from miliacin of millet cultivation in Obernai (Alsace, NE France) during the Bronze and Iron Age

Blandine Courel<sup>1</sup>, Pierre Adam<sup>1</sup>, Philippe Schaeffer<sup>1</sup>, Emile Moser<sup>1</sup>, Clément Féliu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Biogéochimie Moléculaire, Université de Strasbourg  
<sup>2</sup>INRAP, Strasbourg

Archaeometry involving investigation of lipids preserved in an archaeological context is an emerging field of archaeology, and since the last twenty years, this new branch of archaeology has shown its potential for improving our knowledge concerning ancient civilizations through, e.g., their art techniques, agricultural practices, daily life styles, or commercial trades. In this respect, palaeosoils can represent a source rich in information since they may contain preserved lipids that can be used as molecular tracers (or biomarkers) of past vegetation/crops. In the present study, the lipid distributions from loessic soils that have filled grain silos from the Bronze and Iron age excavated by a team from the « Institut National de Recherches Archéologiques Préventives » - INRAP- near the city of Obernai (Alsace, NE France) have been investigated by coupled gas chromatography-mass spectrometry in order to determine if these lipids can provide information regarding the nature of the ancient content of the silos. Among the compounds observed, we have detected miliacin (a triterpenoid biomarker specifically biosynthesized by the broomcorn millet -*Panicum miliaceum*-), suggesting that millet was cultivated and possibly stored in the silos at this archaeological site. The latter possibility was further confirmed by quantification of miliacin in different samples from inside and nearby the silos which clearly shows that the highest concentrations of miliacin are found within these protohistoric silos, whereas this compound is generally absent or at very low concentrations elsewhere. Study of the variations of concentration within the silos is currently underway in order to understand their filling process. In addition, carpologic studies, to be carried out, should confirm our findings based on the detection of this chemotaxonomic biomarker of *P. miliaceum*.

### 5.6.9 (o) Caractérisation moléculaire et réactivité de la matière organique contenue dans les sédiments des lobes sous-marins du système turbiditique du Congo

Elsa Stetten<sup>1,2</sup>, Audrey Pruski<sup>2</sup>, Arnaud Huguet<sup>3</sup>, Haolin Wang<sup>2</sup>, Gilles Vétion<sup>2</sup>, Claire Senyari<sup>2</sup>, Christophe Rabouille<sup>4</sup>, François Baudin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris  
<sup>2</sup>LECOB, Banyuls sur Mer  
<sup>3</sup>METIS, Paris  
<sup>4</sup>LSCe, Gif-sur-Yvette

A son arrivée dans l'Océan Atlantique Sud, le lit du fleuve Congo poursuit sa course par un chenal actif qui se termine à plus de 760 km de la côte par un complexe de lobes situé à ~5000 m de profondeur. Cette zone abyssale de 3000 km<sup>2</sup> est alimentée par des turbidites composées de matériel détritique fin (argiles et limons) enrichi en matière organique (MO) terrigène et dans une moindre mesure par des apports marins issus de l'upwelling du Benguela et du panache du fleuve. L'étude géochimique (%Corg, C/N, δ13C et δ15N) du sédiment réalisée sur sept carottes d'interface prélevées dans différents sites a révélé que les sédiments des lobes constituent un véritable puits de MO particulaire terrigène en provenance du Congo, en considérant Kinshasa comme référence. La matière en suspension à ce site est composée à ~80% par du sédiment fin (<63 μm) dérivant de l'érosion des sols et associée à une MO très altérée, les 20% restants (>63 μm) étant apparentés à des débris végétaux mieux préservés. Afin de préciser la contribution de ces deux sources continentales distinctes et celle des apports pélagiques dans les sédiments des lobes, différents biomarqueurs moléculaires sont étudiés : acides gras (AG), tétraéthers, acides aminés (AA). Cette approche permet aussi d'appréhender les processus affectant la MO lors de son transit vers l'océan profond et après son dépôt. Les analyses montrent que les concentrations et les compositions en AG et AA des sédiments des lobes et du fleuve sont quasiment identiques, suggérant une faible réactivité de la MO apportée par le Congo. Par ailleurs, la proportion d'AG polyinsaturés par rapport aux AG saturés à longue chaîne dans les sédiments est quasi-nulle, indiquant de faibles apports en MO labile pélagique dans la région des lobes. Ces résultats posent la question du devenir de la MO dans les sédiments et seront discutés en considérant la contribution en sol, qui a priori est la source de MO majoritaire dans les sédiments.

### 5.6.10 (o) Glacial/Interglacial surface and intermediate waters reorganisation off Iberia : Insights from organic temperature proxies (Uk'37 and TEX86) and regional biogeochemical modeling

Sophie Darfeuille<sup>1</sup>, Xavier Giraud<sup>1</sup>, Guillemette Ménot<sup>1</sup>, Frauke Rostek<sup>1</sup>, Edouard Bard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

Past sea surface temperatures (SSTs) are often reconstructed using organic proxies such as Uk'37 of alkenones produced by Haptophyte algae, or more recently the TEX86 based on membrane lipids (GDGTs) from marine Thaumarchaeota. However, the interpretations of these proxy records (depth/season of production) differ with environmental and climatic conditions. Here, we present joined Uk'37 and TEX86 derived SST reconstructions for 3 Atlantic cores located off Iberia, spanning 160 to 50 ka BP. The cores are in the context of a seasonal upwelling associated with high productivities during summer. Core top samples show that Uk'37 signal corresponds well to the annual mean SST, whereas

TEXH86-derived SSTs are unrealistic (too high) for this area. Thus, the comparison between both proxies can only rely on relative variations. Both proxy records show in-phase patterns in each core for Termination II but also for the centennial to millennial variability on the last glacial, such as Dansgaard/Oeschger and Heinrich events. However, during the last interglacial complex, proxy variations are asynchronous : alkenones seem to show « Greenland-type » variations whereas GDGTs seem to exhibit an « Antarctic » signal in terms of relative timing. The phasing or not between Uk'37 and TEX86 may be explained by different season and depth of production of the alkenones vs. GDGTs, combined to variable organization of the water column and water provenance between glacial and interglacial conditions due to modified thermohaline circulation patterns. To test these hypotheses, we use a regional physical-biogeochemical coupled model (ROMS-PISCES) applied to the Iberian Margin area and run under different climate states (Interglacial/Glacial/Heinrich) : water masses signatures and origins are evaluated, and online temperature-proxy encodings are tested using different functions of production/export in order to assess the impact of the season and depth of production of each proxy inferred from the sedimentary record.

### 5.6.11 (o) Impact des activités humaines sur la dynamique sédimentaire contemporaine tracée par des marqueurs de type médicaments (bassin de St Samson, Loiret)

Thomas Thiebault<sup>1</sup>, Léo Chassiot<sup>1</sup>, Claude Lemilbeau<sup>1</sup>, Emmanuel Chapron<sup>1,2</sup>, Mohammed Boussafir<sup>1</sup>, Christian Di Giovanni<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>Géographie de l'environnement, Toulouse

La présence de polluants émergents dans les eaux naturelles fait l'objet de plusieurs études depuis quelques années. Cependant, peu d'études s'intéressent à leur présence au sein des sédiments accumulés dans les archives naturelles de bassins sédimentaires, notamment à proximité des zones urbaines. Le présent travail vise à évaluer la qualité des sédiments en milieu anthropique à travers l'étude d'une carotte sédimentaire prélevée dans la rivière du Loiret (bassin de Saint-Samson). L'histoire des lieux et la présence en amont d'une station d'épuration importante (EH > 130 000) font de ce sédiment un candidat idéal pour suivre l'enregistrement de molécules issues de l'activité urbaine. Les objectifs de ce travail sont de (1) rechercher la présence ou non de molécules de type médicaments (2) adapter et optimiser les méthodes d'extraction et d'analyse de ces molécules à ce type de sédiment (3) étudier la distribution du cortège moléculaire le long de la carotte. Ce travail sera couplé à une étude détaillée du sédiment (géochimie moléculaire, spectrocolorimétrie, pyrolyse Rock-Eval, et datation au radiocarbone).

Les premiers résultats de cette étude ont permis de mettre en évidence (1) la présence de médicaments et d'hormones au sein des sédiments (2) un caractère hydrophile des médicaments confirmé par les méthodes d'extraction utilisant des solvants polaires (3) une évolution du cortège moléculaire au cours du siècle dernier corrélable avec les autorisations de mise sur le marché de ces produits et confirmée par la datation radiocarbone effectuée sur le sédiment.

Ainsi, pour la période récente, ces données apparaissent comme de possibles biomarqueurs chronologiques en milieu urbain actuel. Le couplage de ces deux méthodes permet d'établir une chronologie des dépôts du siècle dernier, où les changements lithologiques observés sont en phase avec les changements de pratiques anthropiques observées dans le bassin versant.

### 5.6.12 (p) Potential of GDGTs as temperature proxies along altitudinal transects in east Africa

Sarah Coffinet<sup>1</sup>, Arnaud Huguet<sup>1</sup>, Christine Omuombo<sup>2</sup>, David Williamson<sup>3</sup>, Céline Fosse<sup>4</sup>, Christelle Anquetil<sup>1</sup>, Sylvie Derenne<sup>1</sup>

<sup>1</sup>METIS, Paris

<sup>2</sup>University of Nairobi, Kenya

<sup>3</sup>LOCEAN, Paris

<sup>4</sup>ESCP, Paris

Glycerol dialkyl glycerol tetraethers (GDGTs) are lipids of high molecular weight and include the isoprenoid GDGTs (iGDGTs) produced by Archaea and the branched GDGTs (brGDGTs) produced by unknown bacteria. Indices were developed to describe the relationship between GDGT distribution and environmental parameters : the TEX86, based on the relative abundances of iGDGTs in sediments, correlates with water surface temperature while the MBT and CBT, based on the relative abundance of brGDGTs in soils, correlate with mean annual air temperature (MAAT) and soil pH.

In this study, 41 surface soils were sampled along 2 altitudinal transects, from 500 to 2800 m in Mt. Rungwe (SW Tanzania) and from 1897 to 3268 m in Mt. Kenya (Central Kenya). MAAT was reconstructed along the 2 transects using the MBT/CBT proxy and a linear correlation with altitude was obtained. The reconstructed temperature lapse rate (0.5 °C/100 m) was consistent with the one determined from MAAT measurements at 6 altitudes inferring that the MBT/CBT is a suitable and robust temperature proxy in East Africa. The TEX86 index was also found to vary linearly with altitude along the 2 transects. A similar correlation was recently noticed in soils in Mt. Xiangpi, China (Liu et al., 2013). The adiabatic cooling of air with altitude could explain the TEX86 variation with altitude. If such a relationship is confirmed, its use as a temperature proxy could be extended to soils. However a given TEX86 value was shown to correspond to a much higher altitude (ca. 1800 m higher) for Mt. Xiangpi soils (Liu et al., 2013) than for Mt. Rungwe and Mt. Kenya samples, suggesting that the geographical origin of the soils could impact the TEX86 values. Therefore, a better understanding of the environmental mechanisms controlling the iGDGTs distribution in soils is needed prior any application of the TEX86 as a temperature proxy in these environments.

References

Liu et al., 2013. *Organic Geochemistry* 57, pp. 76-83

### 5.6.13 (p) Reconstruction of past environmental changes in a French peatland via a multi-proxy approach

Arnaud Huguet<sup>1</sup>, Vincent Jassez<sup>2</sup>, Frédéric Delarue<sup>3</sup>, Sylvie Derenne<sup>1</sup>, Edward Mitchell<sup>4</sup>, Hervé Richard<sup>2</sup>, Laurent Grasset<sup>5</sup>, Fatima Laggoun<sup>3</sup>

<sup>1</sup>METIS, Paris

<sup>2</sup>Laboratoire Chrono-environnement, Montbéliard

<sup>3</sup>ISTO, Orléans

<sup>4</sup>Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse

<sup>5</sup>IC2MP, POITIERS

The aim of this study was to reconstruct past environmental changes via the high-resolution analysis of organic matter (OM) composition in a 4 m peat core collected in a temperate peatland (Frasne mire, French Jura Mountains) and covering the last 8,000 cal. BP. In addition to the determination of OM properties, several environmental proxies have been used : testate amoebae, branched GDGTs and pollen analysis. All the data indicated that an ecosystem shift occurred ca. 6,000 cal. BP from

a fen to a Sphagnum-dominated bog. This is especially supported by (i) a strong increase in amorphous OM relative content and (ii) a significant decrease in mucilage and fungal hyphae relative contents, cellulosic sugar abundance and C/N ratio below this depth. In addition, at ca. 6,000 cal. BP, pollen analysis revealed a change in vegetation. Last, drier conditions were indicated by testate amoebae at the bottom of the peat core, whereas wetter conditions occurred at the top.

Mean annual air temperature (MAAT) and pH were reconstructed using the MBT and CBT proxies based on branched GDGTs. The gradual decrease in pH with decreasing depth is consistent with the transition from a fen with intermediate pH to a bog with acidic conditions. The MBT/CBT proxies were shown to overestimate temperature. Thus, in the surface peat, MBT/CBT-derived temperature (ca. 10 °C) was more consistent with spring and summer temperature (ca. 11 °C) than with MAAT (6.8 °C), suggesting that branched GDGT-producing bacteria might be more active during the warmest months of the year. Reconstructed MAAT showed a strong decrease at 6,000 cal. BP in agreement with the development of cooler and wetter conditions in the Jura Mountains after 6,200 cal. BP. This temperature shift very likely reflects both a change in the composition of the peat and in climatic conditions, consistently with the aforementioned geochemical and palynological indicators.

### 5.6.14 (p) Biotic effect on carbon isotope compositions of travertine forming at hyperalkaline springs in the Oman ophiolite : consequences for interpretation of $\delta^{13}\text{C}$ values

Thomas Leleu<sup>1</sup>, Valérie Chavagnac<sup>1</sup>, Adélie Delacour<sup>2</sup>, Catherine Noirié<sup>1</sup>, Markus Aretz<sup>1</sup>, Georges Ceuleneer<sup>1</sup>, Céline Rommevaux-Jestin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>LMV, St Etienne

<sup>3</sup>IPG Paris

The Oman ophiolite is one of the largest sections of oceanic lithosphere exposed on land. Through chemical alteration of olivine-bearing lithologies by meteoric water percolation, serpentinization processes give birth to hyperalkaline (pH up to 12) warm springs totally depleted in dissolved inorganic carbon (DIC) and magnesium. Spring discharge allows precipitation of calcium carbonate through atmospheric CO<sub>2</sub> absorption and/or mixing with Mg-HCO<sub>3</sub>-type run-off waters, leading to the formation of travertine. Travertine samples were collected in hyperalkaline springs of the Sultanate of Oman and characterized for their morphological, mineralogical, geochemical and isotopic composition. Three types of travertine formation conditions were identified based on microscopic and EDX observations : abiotic, biotic, and dual-contributions. In addition, spatial  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  and 87Sr/86Sr measurements were performed on the different laminae of the samples to constrain inorganic exchange reactions versus photosynthetic pathways (C isotopes), contribution of hyperalkaline springs versus run-off waters during precipitation (87Sr/86Sr) and temperature of precipitation (O isotopes).  $\delta^{13}\text{C}$  vs 87Sr/86Sr data show a clear linear trend between hyperalkaline springs and surface run-off waters however some samples show enrichment in <sup>13</sup>C despite an invariant mixing ratio. This is attributed to microscopically-identified biotic features, and reflects preferential uptake of <sup>12</sup>C by photosynthetic organisms in a DIC-depleted environment. In contrast, when travertine formation occurs through atmospheric CO<sub>2</sub> uptake as unique carbon source, calcium carbonates exhibit negative  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values (about -30 and -16‰ respectively relative to PDB). This observation suggests kinetic isotope fractionation involving a combination of CO<sub>2</sub> diffusion and carbonate-ion speciation. Combination of microscopic feature and isotope analyses is thus useful

to identify the role of micro-organisms on calcium carbonate precipitation in DIC-depleted environment.

### 5.6.15 (p) Constraining the age and sources of n-alkanes and alkanolic acids preserved in Lake Pavin sediments (Massif Central, France)

Matthew Makou<sup>1</sup>, Timothy Eglinton<sup>2</sup>, Cameron McIntyre<sup>2,3</sup>, Daniel Montluçon<sup>2</sup>, Vincent Grossi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LGLTPE, Lyon

<sup>2</sup>Geological Institute, ETH Zurich, Suisse

<sup>3</sup>Laboratory of Ion Beam Physics, ETH Zurich, Suisse

Radiocarbon measurements performed on specific organic compounds have revealed much about carbon cycling in marine and continental environments, in many cases suggesting that organic matter can experience long environmental residence times prior to sedimentary deposition. These measurements can also be used to infer biological sources if the radiocarbon content of assimilated carbon is well known. While the study of compound-specific <sup>14</sup>C in marine and riverine systems is well developed and expanding, comparatively little work has been performed in lacustrine settings, despite their prominent use in paleoclimate investigations. Here we measure the <sup>14</sup>C content of individual n-alkanes and alkanolic acids in near-surface sediments from Lake Pavin, a meromictic maar located on the French Massif Central. The selected compounds were chosen in order to provide age and source constraints for biomarkers commonly interpreted as vascular plant derivatives. Radiocarbon ages generally decreased with increasing chain length for both compound classes, from about 9.2 to 1.0 ka for the C<sub>21</sub>-C<sub>33</sub> n-alkanes, and 7.5 to 2.9 ka for the C<sub>14</sub>-C<sub>30</sub> alkanolic acids. The detection of post-bomb radiocarbon in adjacent soils suggests that none of these compounds preserved in the lake sediments fully reflect exclusive higher plant sources and rapid transport of terrestrial organic matter. Similar maximum ages for water column dissolved inorganic carbon (Albéric et al., 2013) suggest a « hard water » effect and significant contributions from microorganismal sources, even for the long-chain C<sub>28</sub> and C<sub>30</sub> alkanolic acids. The C<sub>31</sub> and C<sub>33</sub> n-alkanes are the only investigated compounds that can be inferred as having predominantly higher plant sources, although likely with some degree of soil residence time. As many of the compounds we examined are commonly used in lake sediments to develop records of paleoclimate and vegetation changes, we urge caution in their application without source confirmation.

### 5.6.16 (p) Structural diversity, ecophysiological role and possible utility for (paleo)environmental studies of alkylglycerols from mesophilic bacteria

Arnaud Vinçon-Laugier<sup>1</sup>, Vincent Grossi<sup>1</sup>, Muriel Pacton<sup>1</sup>, Cristiana Cravo-Laureau<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LGLTPE, Lyon

<sup>2</sup>EEM-IPREM, Pau

A major distinction between the domain of Bacteria and Archaea resides in the membrane lipid structure. Generally, bacterial phospholipids are constituted of fatty acids with linear carbon chains esterified to glycerol, whereas the lipids of Archaea are formed of isoprenoidal chains bound to one or two molecules of glycerol by ether linkages. These differences in chemical structures have implications for ecology and evolution between Bacteria and Archaea, and allow the use of these molecules

as environmental and paleoenvironmental biomarkers. Bacterial alkylglycerols are an exception because they have a chemical structure at the intersection between bacterial and archaeal lipids (i.e. linear carbon chains linked to glycerol via ether bonds). Detected in different (hyper)thermophilic bacteria, non-isoprenoidal diethers lipids are usually considered as a characteristic of extremophilic bacteria. However, a wide variety of these biomolecules has been observed in various non-extreme ecosystems, including environments associated with the anaerobic oxidation of methane, where the origin and mode of biosynthesis of these lipids are unknown. Recently, the analysis of the lipid composition of pure strains of sulfate-reducing bacteria demonstrated for the first time the presence of non-isoprenoidal diethers in marine anaerobic mesophilic bacteria. The main goals of the present study have been to better characterize the structure and diversity of these peculiar lipids, and to characterize their (eco)physiological role (i.e., possible role in membrane adaptation) in mesophilic bacteria. Cultures grown under different controlled laboratory conditions (varying growth substrate, temperature, pH, salinity) allowed 1) explaining part of the structural diversity of alkylglycerols observed in situ and, 2) demonstrating the implication of these lipids in cell adaptation to varying environmental conditions, suggesting the utility of these biomarkers as (paleo)environmental proxies.

### 5.6.17 (p) Distribution haute fréquence des biomarqueurs et origine des lamines sédimentaires : une approche par ToF-SIMS sur des sédiments lacustres d'âge Eocène/Oligocène

Julie Ghirardi<sup>1,2</sup>, Benoit Roland<sup>3</sup>, Marie-France Falzon<sup>3</sup>, Jérémy Jacob<sup>1</sup>, Claude Lemilbeau<sup>1</sup>, Florence Quesnel<sup>1,2</sup>, Hugues Bauer<sup>2</sup>, Christian Di Giovanni<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

<sup>3</sup>Centre de Recherche sur la Matière Divisée, Orléans

L'identification et la quantification des biomarqueurs moléculaires dans les sédiments sont classiquement effectuées suite à leur extraction de la matrice, excluant ainsi toute information sur leur localisation. Si cette pratique permet de reconstituer à des échelles pluri-centimétriques les paléoenvironnements, elle ne peut expliquer la distribution des biomarqueurs dans le sédiment à des échelles plus fines pour des questions de prélèvements. Etudier la distribution des biomarqueurs moléculaires dans des fabriques laminées lacustres permettrait par exemple de mieux appréhender les mécanismes qui en sont à l'origine, ce qui constitue la clef pour comprendre la réponse des écosystèmes aux changements haute fréquence (annuels ou pluriannuels) d'origine climatique et/ou géodynamique du bassin.

L'analyse optique de portions laminées lacustres d'âge Eocène/Oligocène indique que les plus petites lamines de la structure ont des épaisseurs inférieures au mm. Une analyse de Fourier du niveau de gris extrait des images permet de proposer un taux moyen de sédimentation d'environ 30  $\mu\text{m}$  par an, et révèle une cyclicité des dépôts.

L'analyse de ces échantillons par Spectrométrie de Masse d'Ions Secondaires à Temps de Vol (ToF-SIMS) offrant une très haute résolution spatiale permet de cartographier les biomarqueurs sur la base de la présence des fragments spécifiques produits durant leur ionisation.

La cartographie des fragments de masses comprises entre  $m/z$  100 et 400 uma (dont  $m/z$  191 et 371 uma caractéristiques des hopanes et des stéranes) montre des hétérogénéités de distribution des biomarqueurs qui soulignent des lamines micrométriques. L'attribution des autres fragments, dont la répartition semble également lamine-dépendante, à des familles de biomarqueurs est en cours et devrait nous permettre de mieux comprendre la dynamique sédimentaire à l'origine de ces lamines.

### 5.6.18 (p) Analyse comparée des biomarqueurs moléculaires dans les sédiments de deux lacs urbains artificiels d'Orléans

Maxime Priou<sup>1</sup>, Jérémy Jacob<sup>1</sup>, Claude Lemilbeau<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

L'avènement de l'Anthropocène, ère caractérisée par les marques indélébiles laissées par l'Homme sur Terre, semble devoir être défini en 1950 (Zalasiewicz, ICS 2014). Pour les paléoenvironnementalistes, l'Anthropocène constitue un nouveau challenge : reconstituer l'évolution des écosystèmes à l'échelle des dernières décennies, en prenant en considération un acteur majeur : l'Homme. A l'instar des études sur des périodes plus anciennes, la Géochimie Organique aura un rôle majeur à jouer pour répondre aux challenges qui s'annoncent : (1) tester les traceurs et proxies classiques dans des contextes hyper-anthropisés tels que les villes ; (2) développer de nouveaux biomarqueurs pour distinguer les activités, pratiques et usages des populations. Ces enjeux motiveront des passerelles entre les géochimistes « paléo » et ceux traitant des questions de pollution.

Nous avons analysé les biomarqueurs préservés dans les sédiments des lacs de l'Université (LU) et de l'Orée de Sologne (LOS) à Orléans afin de déterminer leur potentiel d'archivage (accumulation sédimentaire et typologie des biomarqueurs) et de tenter de reconstituer l'histoire récente du quartier de La Source. Ces lacs artificiels (bétonnés/bitumés) collectent les eaux de pluie et ont été curés dans les années 90. Seuls quelques centimètres de vase ont pu être récoltés dans LOS contre plusieurs dizaines dans LU.

Les cortèges moléculaires contiennent peu de composés xénobiotiques et sont relativement classiques, avec une distribution de n-alcanes témoignant d'une forte contribution de végétaux vasculaires (mais aussi en matériel algaire pour LOS). LOS se distingue par la présence de méthoxy-serratènes, en accord avec la présence de Pinaceae à proximité, alors que ceux du LU contiennent des dioxo-ursène et oléanène dont la source reste à déterminer. De nombreux dérivés de triterpènes pentacycliques ont été détectés dont des composés aromatiques et quelques composés kéto-aromatiques.

# Thème 6

## Physique des roches - *Rock physics*

Animateurs : Daniel Brito (LFC-R, Pau), Clarisse Bordes (LFC-R, Pau)

### 6.1 Propriétés pétrophysiques des roches et applications au monitoring géophysique

(Petrophysical properties of rocks and applications to time lapse geophysics)

**Responsables :**

- André Revil (Ecole des Mines du Colorado, Etats-Unis)  
arevil@mines.edu
- Damien Jougnot (Institut de géophysique, UNIL, Lausanne, Suisse)  
damien.jougnot@unil.ch
- Myriam Schmutz (ENSEGID - IPB, Bordeaux)  
myriam.schmutz@ipb.fr

**Résumé :**

Durant ces dernières années, d'importants financements ont été consacrés au suivi géophysique de processus dynamiques dans le sous-sol et pour des applications de génie civil. En hydrogéophysique, le suivi géophysique est devenu un outil de première importance pour le monitoring de panaches de contamination et leur traitement, l'imagerie spatio-temporelle de tests salins dans les aquifères poreux ou fracturés, l'étude de l'érosion interne des digues et barrages, ainsi que le suivi de la déformation des bâtiments et des sols (glissements de terrain). A plus grande échelle, le suivi géophysique est devenu un outil de choix pour la production de réservoirs géothermiques, le stockage de CO<sub>2</sub>, et la production de réservoirs d'hydrocarbures en particulier à travers la fracturation hydraulique et l'injection de gaz ou d'eau. De grands progrès ont été réalisés dans l'inversion couplée de données géophysiques et mesures in situ en utilisant des simulateurs numériques décrivant le transport réactif, parfois multiphasique, de fluides et de solutés en milieux poreux. Cette connexion demande une description rigoureuse et unifiée des propriétés géophysiques à l'échelle du milieu poreux afin de pouvoir prédire, par simulation numérique directe, la réponse géophysique associée à n'importe quelle perturbation affectant le sous-sol (hydromécanique, chimique, écoulement réactif, transport de solutés).

### 6.1.1 (o) La tomographie temporelle de la densité par la mesure des muons (T2DM2) : simulations du flux et impacts des processus de diffusion

Fanny Hivert<sup>1,2,3</sup>, José Busto<sup>3</sup>, Jurgen Brunner<sup>3</sup>, Jean-Baptiste Decitre<sup>1</sup>, Ignacio Lazaro Roche<sup>1</sup>, Xavier Martin<sup>2</sup>, Stéphane Gaffet<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>LSBB, Rustrel

<sup>2</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>3</sup>Centre de Physique des Particules de Marseille, Marseille

Les muons sont des particules chargées d'origine cosmique. Leur masse importante leur confère la capacité de traverser les premières centaines de mètres de la croûte terrestre. L'atténuation du flux de muons dépend directement de la quantité de matière qu'ils traversent. C'est pourquoi ces particules sont utilisées pour mesurer des variations de densité en subsurface.

Les mesures de flux de muons ont pour but la caractérisation spatiale et temporelle des variations de densité et par conséquent des propriétés physiques du milieu.

Des simulations numériques ont permis d'estimer le flux de muons attendu en fonction de l'épaisseur de roche traversée. Le potentiel d'observation des variations de densité a été défini en fonction de paramètres tels que la durée de mesure ou la surface de détection. Une attention particulière est portée sur l'étude des processus de diffusion des muons dans la roche et leur impact sur le flux de muons. L'estimation des erreurs pouvant être induites par la diffusion des muons est importante pour réaliser de l'imagerie haute résolution. Les détecteurs Micromegas - TPC, utilisés pour les mesures du projet T2DM2, offrent ces hautes résolutions spatiales et angulaires nécessaires pour imager les structures géologiques.

L'un des objectifs du projet T2DM2 est de pouvoir ensuite réaliser des inversions couplées de ces données acquises grâce à la muographie et de données obtenues avec d'autres méthodes géophysiques.

### 6.1.2 (o) Total Organic Carbon prediction in shale gas reservoirs from well-logs data using the Multilayer Perceptron Neural network with Levenberg Marquard training algorithm

Sid-Ali Ouadfeul<sup>1</sup>, Leila Aliouane<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Algerian Petroleum Institute, Boumerdes, Algérie

<sup>2</sup>Geophysics Department, LABOPHYT, Université Mohamed Bougara of Boumerdes, Boumerdes, Algérie

The main goal of this paper is to predict the Total Organic Carbon (TOC) from well-logs data using the Multilayer Perceptron (MLP) neural network machine. In well-logs data two methods are usually used to calculate the TOC, the first method is called the Passey model. This method uses the resistivity and the slowness of the P wave well-logs data. The second method is the so called the Schmoker model, it relates the TOC and the inverse of the Bulk density by a linear relationship and it requires always the measurement of the Bulk density.

Here we suggest a Multilayer perceptron neural network model able to replace the Schmoker method in case of no measurement of the Bulk density, the MLP machine is composed with three layers, an input layer with four neurons corresponding to the Gamma ray, the neutrons porosity, the slowness of the P and S waves well-logs. The output layer has only one neuron that corresponds to the predicted TOC log, a hidden layer with ten neurons. The number of neurons in the hidden layer is obtained after many numerical tests and experiences. The first stage

consists to train the neural network model using well-logs data of a horizontal well located in the Worth basin (USA), the main geological target is the lower Barnett shale formation, at the end of the training the weights of connections between neurons are calculated.

Well-logs data of another horizontal well where the TOC log is unknown are propagated through the implanted neural network machine and a predicted TOC log is obtained, at this stage the calculated weights of connections between neurons during the training phase are used. Comparison between the predicted TOC log and calculated log using the Schmoker method clearly shows the usefulness of the neural network method in shale gas exploration, basin modeling and sweet spots delimitation.

### 6.1.3 (o) Monitoring of a shallow CO2 injection using time lapse electrical resistivity and induced polarization methods.

Thomas Kremer<sup>1</sup>, Myriam Schmutz<sup>2</sup>, Pierre Agrinier<sup>1</sup>, Vincent Allègre<sup>1</sup>, Alexis Mainault<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>ENSEGID, Pessac

Through a field scale experiment, we investigated the efficiency and the reliability of two electrical geophysical methods for the detection and monitoring of a CO2 leakage. The leak was simulated by injecting gaseous CO2 at a depth of six meters, while electrical resistivity tomography (ERT) and temporal induced polarization (TIP) profiles, centered on the injection well, were acquired at the surface. We followed the temporal evolution of the electrical resistivity and TIP parameters compared to a reference acquisition performed before gas injection. The injection lasted for approximately four hours, and the cumulative mass of CO2 injected approached six kilograms. Both methods started showing temporal variations thirty minutes after the beginning of the injection. ERT measurements successively showed a decrease in resistivity (Figure 1) followed by an increase in resistivity that we interpret respectively in terms of gas dissolution and water/gas saturation evolution.

Chargeability measurements proved to be much more sensitive to CO2 injection than resistivity measurements. Measured values showed a continuous increase during the experiment (Figure 2), suggesting that gas dissolution and saturation evolution alone cannot explain these changes, and that another process is involved.

These results are consistent with a previous lab-scale experimental study that already underlined the greater sensitivity of IP methods to detect CO2 transfers in the sub-surface.

### 6.1.4 (o) Complex conductivity of shales

Andre Revil<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Colorado School of Mines, Golden, États-Unis

A four-electrode acquisition system is developed to measure the complex conductivity tensor of tight and anisotropic shale cores using an accurate impedance meter with a precision of 0.1 mrad over the frequency range 1 mHz to 45 kHz. The complex conductivity tensor was obtained by inverting complex electrical potential data (amplitude and phase) acquired over a distributed electrode array. Inversion of the acquired data is performed with a Markov chain Monte Carlo (MCMC) sampler that can explicitly take into account the non-uniqueness of the inverse problem. This approach is validated with direct measurements of impedance tensor eigenvalues with a single-component measurement technique. Consistent results were obtained using these two methods validating those obtained through the MCMC sampling strategy. Both the in-phase and quadrature conductivities are anisotropic with the same

anisotropic ratio in agreement with a recently developed petrophysical model based on volume averaging. The type of anisotropy of the Bakken and Haynesville core samples is found to be transverse isotropic (TI), with the anisotropic ratio on the order of 10. In-phase conductivity is found to be independent of frequency up to 100 Hertz while the magnitude of the quadrature conductivity increases with frequency in the range 0.1 to 45 kHz. Both components are sensitive to water saturation. Surface conductivity can be reliably predicted from the quadrature conductivity, which is in agreement with the model prediction based on volume-averaging. Complex conductivity can be imaged through cross-well active electromagnetic methods and we have developed an inversion algorithm to perform such tomography.

### 6.1.5 (o) Discrete Dual Porosity Modeling of Electrical Current Flow in Fractured Media

Delphine Roubinet<sup>1</sup>, James Irving<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Lausanne, Applied and Environmental Geophysics Group, Suisse

The study of fractured rocks is highly important in a variety of research fields and applications such as hydrogeology, geothermal energy, hydrocarbon extraction, and the long-term storage of toxic waste. Fractured media are characterized by a large contrast in permeability between the fractures and the rock matrix implying that the identification of fracture network characteristics is a critical, challenging, and required step.

A number of previous studies have indicated that the presence of fractures in geological materials can have a significant impact on geophysical electrical resistivity measurements. It thus appears that, in some cases, geoelectrical surveys might be used to obtain useful information regarding fracture network characteristics. However, existing geoelectrical modeling tools and inversion methods are not properly adapted to deal with the specific challenges of fractured media. This prevents us from fully exploring the potential of the method to characterize fracture network properties. We thus require the development of accurate and efficient numerical modeling tools specifically designed for fractured domains.

Building on the discrete fracture network (DFN) approach that has been widely used for modeling groundwater flow in fractured rocks, we have developed a discrete dual-porosity model for electrical current flow in fractured media. Our novel approach combines an explicit representation of the fractures with fracture-matrix electrical flow exchange at the block-scale. Tests in two dimensions show the ability of our method to deal with highly heterogeneous fracture networks in a highly computationally efficient manner, which permits us to study the impact of fractures and their properties on the electrical response of the domain. With additional development, the method will be extended to three dimensions and used in the context of geoelectrical field investigations.

### 6.1.6 (o) Hydraulic conductivity field characterization from the joint inversion of hydraulic heads and self-potential data

Abdellahi Soueïd Ahmed<sup>1</sup>, Abderrahim Jardani<sup>1</sup>, André Revil<sup>2</sup>, Jean-Paul Dupont<sup>1</sup>

<sup>1</sup>M2C, Caen

<sup>2</sup>Colorado School of Mines, Golden, États-Unis

Pumping tests can be used to estimate the hydraulic conductivity field from the inversion of hydraulic head data taken intrusively in a set of piezometers. Nevertheless, the inverse problem is strongly underdetermined. We propose to add more information by adding (non-intrusive)

self-potential data taken at the ground surface during pumping tests. These self-potential data correspond to perturbations of the electrical field caused directly by the flow of the ground water. The coupling is electrokinetic in nature that is due to the drag of the excess of electrical charges existing in the pore water. These self-potential signals can be easily measured in field conditions with a set of the non-polarizing electrodes installed at the ground surface. We used the adjoint-state method for the estimation of the hydraulic conductivity field from measurements of both hydraulic heads and self-potential during pumping tests. In addition, we use a recently developed petrophysical formulation of the streaming potential problem using an effective charge density of the pore water derived directly from the hydraulic conductivity. The geostatistical inverse framework is applied to five synthetic case studies with different number of wells and electrodes. To evaluate the benefits of incorporating the self-potential data in the inverse problem, we compare the cases in which the data are combined or not. Incorporating the self-potential information improves the estimate of hydraulic conductivity field in the case where the number of piezometers is limited. However, the uncertainty of the characterization of the hydraulic conductivity from the inversion of the self-potential data is dependent on the quality of the distribution of the electrical conductivity used to solve the Poisson equation. Consequently, the approach discussed in this paper requires a precise estimate of the electrical conductivity distribution of the subsurface and requires therefore new strategies to be developed for the joint inversion of the hydraulic and electrical conductivity distributions.

### 6.1.7 (p) Prospection géophysique des digues de résidus miniers de la mine abandonnée de Zeïda (Maroc) par tomographie électrique et méthode magnétique

El Mehdi Benyassine<sup>1</sup>, Abdelilah Dekayir<sup>1</sup>, Mohamed Rouai<sup>1</sup>, Jean Claude Parisot<sup>2</sup>, Pierre Etienne Mathé<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ER Géoexplorations & Géotechniques, Zitoune, Meknès, Maroc

<sup>2</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

La mine de plomb zinc de Zeïda, abandonnée depuis 1985, est située au centre du bassin de la haute Moulouya, au NE du Maroc. Cette mine renferme des digues de résidus du traitement du minerai déposés sans aménagement au centre de la mine et de part et d'autre de l'oued Moulouya. Ces résidus présentent des teneurs moyennes en Pb (3000 ppm) et Zn (140 ppm), essentiellement sous forme de galène et barytine. Une étude géophysique a été réalisée en utilisant la tomographie électrique (ABEM SAS 4000) et un magnétomètre différentiel portable à deux ampoules.

Dans le périmètre de la mine abandonnée de Zeïda, le paysage est constitué principalement par des granites altérés. Les images 2D de tomographie électrique ont révélés des structures aux contours arrondis, présentant des résistivités élevées. Elles sont attribuées, à des boules granitiques avec un noyau sain entouré par des écailles montrant un gradient d'altération de plus en plus important vers la périphérie (altération centripète). Ceci est démontré par des valeurs de résistivité de plus en plus faible en allant vers la périphérie des boules. Ces dernières sont séparées entre elles par des joints riches en produits d'altération argileux et favorisant la circulation des fluides. Sur les images 2D, ces boules de granite sont couvertes par un matériau très conducteur correspondant aux résidus miniers avec des prolongements en profondeur (jusqu'à 60 m) sous forme de lobes très conducteurs. La cartographie magnétique de ces digues a permis de mettre en évidence des anomalies de variation locale du champ magnétique qui reflètent l'existence de structure magnétique correspondant probablement à des restes métalliques enfouis dans les digues. Il ressort des premiers résultats de cette étude que les digues fonctionnent comme des « entonnoirs » favorisant le drainage,

vers les nappes et l'oued, d'eau qui, en percolant à travers les résidus, vont potentiellement se charger en métaux (Pb, Zn).

### 6.1.8 (p) Signification géologique des données aéromagnétiques de la partie NE du massif central marocain

Nawal Bouya<sup>1</sup>, Hmidou El Ouardi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université Moulay Ismail, Zitoune, Meknès, Maroc

Dans ce travail intéressant la partie NE du massif central marocain, nous avons utilisé les méthodes standards utilisées en aéromagnétisme pour rechercher la signification géologique des anomalies détectées. Nous avons tout d'abord comparé les cartes magnétiques aux cartes géologiques existantes et ensuite vérifié certaines anomalies sur le terrain. Notre démarche s'est avérée intéressante dans la mesure où nous avons pu apporter des amendements à la carte géologique de la région d'Agourai et d'esquisser celle de la région de Bou Chber. La superposition de la carte du champ magnétique résiduel réduit au pôle aux cartes géologiques d'Agourai et d'El Hajeb permet de constater que le causse d'Agourai montre des anomalies faibles par rapport au socle paléozoïque sous-jacent. Ceci peut être expliqué par la prédominance des formations carbonatées dans le causse contrairement au socle formé par des terrains déformés, légèrement métamorphisés et intrudés de sills et de dykes basaltiques et gabbroïques. Ainsi, il est évident que de fortes corrélations existent entre les anomalies déterminées d'une part, et les formations géologiques et les linéaments structuraux, d'autre part. Les anomalies magnétiques détectées dans la région d'Agourai-El Hajeb sont compatibles avec les structures géologiques régionales. Les fortes anomalies coïncident avec les affleurements triasiques (argiles rouges et basaltes doléritiques) qui ceignent le causse d'Agourai et le plateau d'El Hajeb. Les anomalies linéaires détectées dans le causse d'Agourai sur la carte RAP et la carte de la dérivée horizontale sont confirmées par la méthode tilt angle et la déconvolution d'Euler, elles sont parfaitement corrélables aux principales failles NE-SW à ENE-WSW qui affectent la région. La méthode de déconvolution d'Euler permet d'estimer sa profondeur à plus de 2500m. Quoi qu'il en soit, nous confirmons par plusieurs méthodes standards que dans cette région, cette source pourrait correspondre à des roches basiques ou ultrabasiques enfouies, à partir desquelles se détachent l'ensemble des dykes basiques qui affleurent dans cette partie du Massif central marocain. Ainsi, l'application de la méthode magnétique dans cette région, nous a permis de préciser la cartographie géologique de certains secteurs, bien que l'espacement des lignes de vol, ne permet de détecter que les structures régionales.

### 6.1.9 (p) Influence du CO<sub>2</sub> sur la résistivité électrique complexe d'un échantillon de calcaire oligocène supérieur

Miloud Chermali<sup>1</sup>, Olivier Le Roux<sup>1</sup>, Adrian Cerepi<sup>1</sup>, Jean Rillard<sup>1</sup>, Grégory Cohen<sup>1</sup>, Corinne Loisy<sup>1</sup>, Bruno Garcia<sup>2</sup>, Philippe Delaplace<sup>2</sup>, Virgile Rouchon<sup>2</sup>, Sonia Noirez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ENSEGID, Pessac

<sup>2</sup>IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison

Une des principales qualités d'un site géologique de stockage de CO<sub>2</sub> doit être de présenter une probabilité de fuites minimale. Il a ainsi été récemment proposé qu'un taux de 0,01% / an de fuite de CO<sub>2</sub> serait considéré comme risque maximum toléré au droit d'un site de séquestration géologique de CO<sub>2</sub>. Il apparaît donc nécessaire de mettre en place des systèmes de surveillance géochimique et géophysique des sites de stockages géologiques de CO<sub>2</sub> pour détecter ces fuites, évaluer leur importance et prévoir d'éventuelles actions correctives. Un site pilote a été

instrumenté au sein d'anciennes carrières souterraines en Gironde de manière à tester la sensibilité de la résistivité électrique vis-à-vis de la concentration en CO<sub>2</sub> au sein du massif carbonaté lors de fuites provoquées de CO<sub>2</sub>. De manière à mieux comprendre l'origine de la relation observée entre concentration en CO<sub>2</sub> et résistivité électrique, des expériences en laboratoire ont été menées.

L'objectif de cette étude est de tester l'influence du CO<sub>2</sub> sur la résistivité électrique complexe d'une carotte de calcaire Oligocène supérieur provenant du site pilote. Pour ce faire, après séchage et désaération de l'échantillon, celui-ci est saturé par une eau à 1 g/l en NaCl puis mis en place dans une cellule de Hassler (Ergotech Mk4). Cette équipement permet à la fois de désaturer progressivement la carotte par application d'une pression capillaire et de réaliser des mesures de la résistivité électrique entre 20 Hz et 2 MHz en utilisant un impédancemètre (Agilent E4980A).

Deux expériences ont été menées en utilisant deux gaz différents pour la désaturation (N<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub>) afin de mettre en évidence l'influence du CO<sub>2</sub> sur les paramètres électriques (indice de résistivité, fréquence critique, potentiel spontané).

### 6.1.10 (p) Etude à l'interface nappe-rivière par tomographie de résistivité 3D et traçage au sel

Clémence Houzé<sup>1</sup>, Marc Pessel<sup>1</sup>, Véronique Durand<sup>1</sup>, Tohir Ali<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEOPS, Orsay

Située à l'interface entre les eaux souterraines et les eaux de surface, la zone hyporhéique est le lieu d'interaction et de mélanges entre les systèmes aquifères souterrains et les eaux de surface. Considérée à la fois comme un habitat naturel riche et un lieu crucial où se font les échanges entre la nappe et la rivière, cette zone représente la charnière liant les deux principales entités, hydrologique et hydrogéologique, dont la protection est devenu un enjeu mondial. C'est pourquoi depuis quelques années de nombreuses études visant à comprendre plus précisément les interactions et flux d'eau entre ces deux compartiments ont été réalisées, mais de nombreux points sont encore à éclaircir. Dans ce but, une étude hydrogéophysique de la zone hyporhéique a été réalisée sur un petit cours d'eau du bassin versant de l'Orgeval (Seine et Marne) afin de parvenir à une caractérisation plus précise de la géométrie et du fonctionnement de cette zone. Ainsi, des campagnes de mesures de résistivité ont permis de réaliser des tomographies électriques 3D d'une portion du fond de rivière. Pour cela, un système constitué de 180 électrodes a été mis en place afin de pouvoir réaliser des mesures à petite échelle au fond du cours d'eau. De plus, le couplage de cette technique avec le suivi temporel d'un traçage au sel artificiel ajoute une dimension d'évolution temporelle, ouvrant la possibilité de suivre les écoulements au sein de la zone hyporhéique de façon précise. Les premiers résultats obtenus montrent la faisabilité de ces mesures et ont permis de définir un protocole d'acquisition des données. Les profils obtenus ont été inversés puis traités afin de pouvoir travailler en différence par rapport à un état d'origine, soulignant ainsi l'évolution temporelle de la résistivité dans le milieu.

### 6.1.11 (p) Laboratory-scale electrical resistivity and fluorimetric monitoring of saline tracer tests under partially saturated conditions

Damien Jougnot<sup>1</sup>, Joaquin Jiménez-Martínez<sup>2</sup>, Niklas Linde<sup>1</sup>, Tanguy Le Borgne<sup>2</sup>, Yves Méheust<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut des Sciences de la Terre, Université de Lausanne, Suisse

<sup>2</sup>Géosciences Rennes

Time-lapse electrical resistivity tomography is widely used to remotely monitor water saturation and contaminant plumes. Petrophysical relationships are needed to link electrical measurements to subsurface properties of primary interest. Most petrophysical relationships are based on mixing laws or upscaling procedures (e.g., differential effective medium, volume averaging) that are well understood in saturated media at homogeneous pore water composition. The effects of heterogeneous solute concentrations (i.e., fingering of a saline tracer) and fluid distributions (i.e., air and water) below the resolution of geophysical tomograms are currently ignored in most hydrogeophysical studies. We adapted an existing experimental set-up to study the effects of sub-resolution heterogeneities on the effective bulk electrical resistivity. We used a 2D analogous porous medium consisting of a Hele-Shaw cell containing a single layer of 4500 cylindrical solid grains built by soft lithography. We monitored the bulk electrical resistivity between two electrodes at a temporal resolution of 2 s. At the same time, we monitored the phase distribution and the local concentration field using a fluorescent tracer and a high-resolution camera (27 pixels per mm, 12 bit images). Our experiments included drainage and imbibition, as well as high salinity tracer tests under full and partial saturations. The measured bulk electrical resistivities are currently compared to those computed (1) numerically at the pore scale based on the local salinity and saturation fields obtained by image processing and (2) by applying petrophysical relationships defined at the scale of the porous media. We expect that this work will give rise to more robust upscaled petrophysical models and better understanding of sub-resolution effects in hydrogeophysics. The experimental approach will be extended to include spectral induced polarization and self-potential measurements under different water saturations.

### 6.1.12 (p) Détection et cartographie des dérangements affectant la série phosphatée du bassin des Oulad Abdoun - Maroc -

Oussama Khadiri Yazami<sup>1</sup>, Essaid Jourani<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*OCP Group, Khouribga, Maroc*

Dans le bassin sédimentaire des Oulad Abdoun, la série sédimentaire est constituée de séquences présentant une alternance de couches de phosphate interstratifiées avec des niveaux stériles constitués de calcaire phosphaté, de bancs ou rognons de silex et de niveaux marneux et argileux. Cet aspect stratiforme est occasionnellement perturbé par des « dérangements » rendant la délimitation des différentes entités impossible ou incertaine. Ces dérangements, généralement de forme conique s'étendent sur plusieurs dizaines de mètres et peuvent affecter plusieurs niveaux stratigraphiques. Ils sont rencontrés dans certains gisements situés au Sud-Est du bassin des Oulad Abdoun et sont dans la majorité des cas masqués sous la couverture quaternaire.

Bien que l'origine de ces dérangements reste mal connue, elle peut être liée à plusieurs phénomènes dont on peut citer :

- des phénomènes sédimentaires liés à l'échappement d'eau, compaction, instabilités...
- des phénomènes tectoniques ...
- des phénomènes sismiques synsédimentaires
- des structures d'effondrement par dissolution, similaires aux dolines créées par dissolution karstique des carbonates.

Stériles et durs, ces dérangements ne sont généralement détectables en partie que lors de la prospection par puits/sondages ou par des indices de surface.

En absence des méthodes de reconnaissance géophysique, ces dérangements sont limités, pour les besoins d'estimation, par les zones d'influence des ouvrages de reconnaissance.

Cependant, Depuis le début des années 2000, plusieurs essais de reconnaissance géophysique (résistivité électrique, électromag., sismique, GPR...) ont été réalisés en collaboration avec des universités nationales

et internationales pour localiser de manière prédictive les dérangements. L'objectif derrière ces essais est d'adapter la méthode géophysique la plus optimale en matière de précision, de temps d'acquisition et de traitement pour pouvoir cartographier les zones susceptibles de renfermer des dérangements. Ce type de cartographie permettrait d'améliorer l'estimation des ressources et réserves en phosphate et pourrait servir d'outil de prise de décision quant à la planification des circuits d'exploitation.

Suite à ces essais, deux méthodes géophysiques électromagnétiques (Sondage électromagnétique temporel TDEM et Sondage électromagnétique fréquentiel EM31) se sont avérées concluantes, faciles à mettre en œuvre et assurent une rapidité d'acquisition et de traitement du signal.

### 6.1.13 (p) Premiers résultats de sondages RMP sur le site expérimental de LaSalle Beauvais

Pascale Lutz<sup>1</sup>, Lahcen Zouhri<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais*

Dans le cadre des activités de recherche de la plateforme hydrogéologique et du site expérimental de l'Institut Polytechnique LaSalle, des mesures hydrogéologiques et hydrogéophysiques ont été réalisées afin de caractériser la géométrie de l'aquifère de la craie de Beauvais (Picardie), ainsi que son comportement et son évolution. Ce suivi pluridisciplinaire consiste en des relevés piézométriques et mesures météorologiques, complétés par des mesures géophysiques de subsurface (tomographies électriques, sismique réfraction) et de diagraphies (gamma-ray ; conductivité de l'eau ; température). Une analyse temporelle des principales sections de résistivité obtenues au niveau du site expérimental LaSalle Beauvais à différentes périodes sera présentée, en relation avec l'évolution du niveau piézométrique. Un développement méthodologique sera également détaillé, consistant à déterminer, à partir de la tomographie électrique, des sections de résistivité transverse puis à estimer la transmissivité (paramètre hydrologique habituellement estimé à partir des pompages d'essai). Afin de développer le site expérimental LaSalle Beauvais, l'institut a acquis dernièrement les outils nécessaires à la réalisation de « sondages par Résonance Magnétique des Protons (RMP) ». La mise en œuvre de cette méthode d'estimation de la teneur en eau de manière directe devrait contribuer à améliorer la caractérisation hydrogéophysique de l'aquifère de la craie de Beauvais, en complément à la tomographie électrique, méthode indirecte dont le paramètre mesuré (la résistivité) ne dépend pas uniquement de la teneur en eau, mais de plusieurs paramètres (granulométrie, teneur en argile, fracturation, conductivité de l'électrolyte...). Les premiers tests réalisés par sondage RMP seront décrits.

### 6.1.14 (p) On the wellbore stability in shale gas reservoirs

Sid-Ali Ouadfeul<sup>1</sup>, Leila Aliouane<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Algerian Petroleum Institute, Boumerdes, Algérie*

<sup>2</sup>*Geophysics Department, Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie, Université Mohamed de Boumerdes, Algérie*

Wellbore stability in shale gas reservoirs is one of the major problems during the drilling phase ; bad stability can induce the breakouts and drilling induced fractures. Wellbore stability requires the good knowledge of horizontal maximum and minimum stress, the overburden stress and the pore pressure. In this paper, we show a case study of the wellbore stability and how to estimate the mud weight in shale gas reservoir of the Barnett shale formation before drilling. The overburden

stress is calculated from the seismic inversion, the minimum stress is calculated using the poro-elastic model, and however the pore pressure is calculated using the Eaton's model.

### **6.1.15 (p) Caractérisation des aquifères de socle et modélisation de l'écoulement souterrain : amélioration de la productivité des forages d'hydraulique villageoise du bassin versant du Bandama blanc amont**

Moussa Ouedraogo<sup>1,2</sup>, Marc Pessel<sup>1</sup>, Véronique Durand<sup>1</sup>, Christelle Marlin<sup>1</sup>, Issiaka Savané<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*GEOPS, Orsay*

<sup>2</sup>*Laboratoire de Géosciences et Environnement, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire*

Le bassin versant du Bandama blanc amont, au nord de la Côte d'Ivoire, est situé sur un socle fissuré, composé de granites et de schistes, et constitue un aquifère pérenne pour l'approvisionnement en eau des populations. Cet aquifère de type fissuré est mal connu, tant dans la géométrie des réservoirs que dans le potentiel hydrogéologique des réserves qu'il contient. La précarité des populations rurales est en partie liée au manque d'eau potable ainsi qu'au nombre encore insuffisant des points d'approvisionnement. Un nombre important d'échecs a été observé lors de la réalisation des ouvrages de captages des eaux souterraines, dont l'une des causes est une faible connaissance du fonctionnement du milieu.

Cette étude consiste à améliorer les connaissances sur le fonctionnement hydrodynamique des réservoirs du socle fissuré (géométrie des aquifères, paramètres hydrodynamiques, recharge, disponibilité et exploitabilité de la ressource) en vue de l'installation d'ouvrages de captage.

L'approche méthodologique multidisciplinaire intègre des méthodes d'hydrogéophysique, d'hydrogéologie, de géologie, de chimie en couplant des mesures de terrain à de la modélisation numérique. Il s'agit de développer de nouvelles techniques et outils appropriés de prospection pour affiner la caractérisation du socle fissuré (méthodes électrique, électromagnétique, résonance magnétique protonique), afin de mieux contraindre l'exploitation des sites, notamment en terme de stabilité des débits prélevés.

Une première campagne de mesures en février 2014 a permis de caractériser la géométrie et la lithologie de l'aquifère à l'aide d'un large profil électromagnétique (25 km). Les mesures physico-chimiques montrent une importante hétérogénéité des puits/forages disponibles, qui en première approche est corrélée avec la lithologie du bassin.

## 6.2 Propriétés de transport et leurs couplages (CNFGG)

### (Transport properties and their coupling) (CNFGG)

#### Responsables :

- Laurence Jouniaux (IPG Strasbourg) l.jouniaux@unistra.fr
- Alexis Maîneult (IPG Paris) maineult@ipgp.fr

#### Résumé :

Cette session s'attache à mieux comprendre le transport en milieu poreux. Les transports hydrique et électrique sont contrôlés en partie par la perméabilité, la conductivité électrique, et l'électrofiltration. Cette session s'intéressera en particulier aux transports et à leurs couplages dans des conditions multiphasiques (eau, air, glace, hydrocarbures, CO<sub>2</sub>), avec des méthodologies incluant l'approche expérimentale, les observations de terrain, et la modélisation. Les travaux de la petite échelle à la grande échelle sont attendus afin d'avoir une meilleure connaissance des processus physiques mis en oeuvre, ainsi qu'une meilleure interprétation des observations de terrain (méthodes électriques et électromagnétiques en général). Cette thématique touche à des applications telles que l'hydrogéophysique, les ressources en fluides, les déformations de la croûte, et la remédiation de polluants. Elle s'inscrit dans les problématiques actuelles sur l'environnement, les aléas naturels, et l'énergie.

### 6.2.1 (o) Effects of precipitation on flow in fractures

Catherine Noiriel<sup>1</sup>, Pierre Le Guern<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

One of the major challenges associated with sequestration of carbon dioxide, given the complexity and range of coupled thermal, hydrological, mechanical, and chemical processes involved, is the understanding of geochemical reactivity in the case of long-term sequestration. In particular, fractures could alter the sealing integrity of caprocks, and an effort must be done to better understand the process of fracture sealing and healing during flow of reactive fluids.

The effects of calcite precipitation in fractures were evaluated through an experimental study. Several experiments using fractures of very simple geometry made in a limestone were injected at different flow rates with a supersaturated mixture of CaCl<sub>2</sub> and NaHCO<sub>3</sub> to induce calcite growth. Spatially resolved determination of calcium carbonate precipitation using X-ray micro-tomography with a resolution of 12.23 μm allows for determination of the precipitation rate over the fracture wall surfaces. Results will be compared in terms of crystal shape and growth rate in relationship with the mineralogy of the rock, saturation index of the fluid, and flow properties within the fractures. The impact of crystal distribution on pore scale flow and permeability is then evaluated through numerical modeling.

### 6.2.2 (o) Pore-scale modeling of water-gas flow in underground hydrogen storage

Irina Panfilova<sup>1</sup>, Mojdeh Rasoulzadeh<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LEMTA, Nancy

We consider underground storage of hydrogen in water saturated geological trap or in aquifer. During hydrogen injection in water-wet rocks water is displaced by gas. Such a process is hydro-dynamically unstable because of high difference in fluids' viscosities. As the result, the interface is deformed producing fingers. This instability leads to hydrogen dispersion and trapping of gas in the reservoir. Such instability can be equilibrated with the capillary forces and the gravity in vertical direction. The lateral fingering can provoke gas leakage outside the geological trap.

The injected hydrogen is dissolved in water through the interface (menisci). The dissolved hydrogen and carbon dioxide stimulate bacterial activity near the interface, which leads to the production of methane and consumption of H<sub>2</sub> in the vicinity of the interface. The reduction in hydrogen concentration provokes the dissolution of a new portion of H<sub>2</sub>. The dissolved gas reduces the surface tension and the contact angle, which produces the increase of capillary forces, and, consequently, the stabilization of displacement.

Using the capillary network model, the numerical simulation of water displacement by gas was carried out. The capillary force on menisci depends on the dissolved gas concentration via the surface tension and contact angle. To determine the gas concentration in water the kinetics of chemical reactions of bacterial activity was used. The relative phase permeability  $K_r$  for H<sub>2</sub>-water drainage was obtained. The shape of the  $K_r$  curves depends on the concentration of dissolved gas in water. The relative permeability curves have the reduced saturation for end-points and show the better microscopic sweep efficiency.

The effect of proposed  $K_r$  curve for hydrogen and the classical models like Corey-Brooks, Van Genutdchen, linear and cubic approximation has been studied on several simulations. A sensitivity analysis has been driven to show how simplifying assumptions, like constant (or) variable density of gas and liquid phase, can affect the results. The presence of weak / linear / and strong adsorption of H<sub>2</sub> into the rocks is also studied.

### 6.2.3 (o) Borehole seismoelectric logging using a shear-wave source : Possible application to CO<sub>2</sub> disposal

Fabio Zyserman<sup>1</sup>, Laurence Jouniaux<sup>2</sup>, Sheldon Warden<sup>2</sup>, Stéphane Garambois<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CONICET, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina

<sup>2</sup>IPG Strasbourg

<sup>3</sup>ISTerre, Grenoble

The behaviour of CO<sub>2</sub> deposition sites -and their surroundings- during and after carbon dioxide injection has been matter of study for several years, and several geophysical prospection techniques like surface and crosshole seismics, geoelectrics, controlled source electromagnetics among others, have been applied to characterize the behaviour of the gas in the reservoirs. We investigate the seismoelectric method to assess its potentiality to detect CO<sub>2</sub> saturations. Seismoelectric signals are electrokinetically generated by the propagation of seismic waves within the porous material. We use a 1D version for the SHTE mode of the finite elements solver (FE) by Zyserman et al (1), which features infinite sources generating 1D wave fields in likewise layered media for the modeling of the seismoelectric conversions. By solving Pride's equations, extended to deal with partial saturations (2), we produce numerical evidence that shear wave driven seismoelectric and seismomagnetic interface responses are generated at boundaries between units partially saturated with carbon dioxide. These signals can be measured using surface to borehole seismoelectric layouts and are sensitive to a wide range of CO<sub>2</sub> saturations, presently detected only partially either with seismics or geoelectrics.

(1) - Zyserman et al., J.Applied Geophysics 72, 79-91, 2010 ; J. Applied Geophysics 86, 98-108, 2012

(2) - Warden et al., GJI, 194, 1498-1513, 2013

### 6.2.4 (o) Quantitative measurements of coseismic seismoelectric fields for varying salinity and water content

Julia Holzhauser<sup>1</sup>, Clarisse Bordes<sup>1</sup>, Daniel Brito<sup>1</sup>, Bertrand Guatarbes<sup>1</sup>, Jean-Paul Callot<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau

Resulting from an electrokinetic coupling, the seismoelectric (SE) effect was identified at field scale in the 1940s. But for long, observations remained strictly qualitative due to the weakness of the resulting electromagnetic fields and the incomplete understanding of the underlying physics. Finally, by combining poroelastodynamic formulation derived from Biot's theory to Maxwell's equations, Pride proposed a robust explanation for the SE effect in 1994. Within a decade, a dynamic formulation of the coseismic transfer function depending on a dozen parameters of the medium had been given.

Our purpose is to confront this model to measurements carried out on a simple porous medium at lab scale. In this experiment, a seismic wave generated by a pneumatic source propagates within unconsolidated monodisperse silica-sand for varying water content and salinity. The source shows a wide frequency spectrum [0.5 ? 5kHz] enclosing the Biot frequency, which marks the transition of viscosity to inertia-driven flow and announces the dynamic dependence of the SE transfer function.

To this end, a 120l sandbox was equipped with 20 accelerometers, 5 water-sensors and a 30 rods electrode array, all placed with a maximum offset of 30cm to the source. Electric dipoles were defined relatively to the last electrode of the array to enable the reconstruction of any dipole-length afterwards. This allowed checking the likeness of a given seismic acquisition to various electric records differing in dipole length

and position to determine the best fit. By changing salinity in the range [2-8mS/m] at constant saturation, we observed a decrease in the transfer function proportional to the salinity increase, consistent with the computed transfer functions and published results as well. This proved quantitative measuring possible. After a relaxation time, a dramatic increase in seismic velocities attested that full saturation had been reached, leading to a whole new field of investigation regarding SE dependence on water content.

### 6.2.5 (o) Self-potential monitoring and modeling of a saline tracer infiltrating the vadose zone at the HOBE agricultural test site, Voulund, Denmark

Damien Jougnot<sup>1</sup>, Niklas Linde<sup>1</sup>, Majken Looms<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut des Science de la Terre, Lausanne, Suisse

<sup>2</sup>Department of Geosciences and Natural Resource Management, University of Copenhagen, Denmark

Geophysics offers a variety of non-intrusive techniques to study near-surface processes of relevance for environmental sciences. One such technique is the self-potential (SP) method that is, among other contributors, sensitive to water fluxes. This contribution, the so-called streaming potential, results from the presence of an electrical double layer at the mineral-pore water interface. When water flows through the pore space, it gives rise to a streaming current and a resulting measurable electrical voltage. Streaming current generation is well understood in water-saturated porous media, but its modeling under partial saturation is still an area of active research. To evaluate how SP data and state-of-the-art models can be used to characterize flow and transport phenomena in the vadose zone, we conducted field-based monitoring of vertical variations of the SP signal during 36 months. The investigations were carried out at the Voulund agricultural test site of the Danish hydrological observatory (HOBE). The site is instrumented to monitor suction, water content and temperature down to a depth of 3 m, together with meteorological variables and repeated geophysical crosshole surveys. We installed 15 non-polarizable electrodes at 10 different depths within the vadose zone and placed the reference electrode below the water table. Data were acquired every 5 minutes and the record included various hydrologic events, such as natural infiltration, water table rises, and a high salinity tracer infiltration. We developed a fully coupled numerical scheme to simulate water fluxes and ionic transport in order to predict bulk electrical conductivity and the SP signal. The simulation results of the tracer test agreed rather well with the measured SP data. This model will now be used together with the 36 months of data to carry out a detailed assessment of the predictive value of the SP method in vadose zone hydrology, with specific focus on in situ monitoring of water flux.

### 6.2.6 (p) Etude pluridisciplinaire et modélisation des écoulements fluides en contexte hydrothermal dans la zone sommitale du volcan Stromboli

Cécile Mezon<sup>1</sup>, Raphael Antoine<sup>2</sup>, Stephanie Barde-Cabusson<sup>3</sup>, Eric Delcher<sup>4</sup>, Yannick Fargier<sup>2</sup>, Anthony Finizola<sup>1</sup>, Tullio Ricci<sup>4</sup>, Maria Luisa Carapezza<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Université de la Réunion, IPG Paris, Laboratoire GéoSciences Réunion, Saint Denis

<sup>2</sup>CEREMA Normandie-Centre, Grand-Quevilly

<sup>3</sup>Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Barcelona, Espagne

<sup>4</sup>Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma, Italie

Cette étude vise à caractériser, d'un point de vue spatial (à l'échelle métrique) et temporel, la zone de remontée hydrothermale identifiée au sommet du Stromboli. L'approche spatiale repose sur une base de données composée de :

- 5829 mesures en Tomographie de Résistivité Electrique (TRE) issues de 13 profils acquis avec des résistivimètres ABEM SAS 4000 et Terrameter LS (11 à 5 m d'espacement et 2 à 2 m d'espacement inter-électrodes, 64 électrodes par profils)
- 1664 mesures de Température (T°) à 30 cm de profondeur (11 profils à 2,5 m d'espacement, et 2 profils à 1 m d'espacement)
- 1664 mesures de Polarisation Spontanée (PS)

Les données TRE ont été inversées avec le nouveau code Colibri43 [Fargier, 2011]. Son avantage est de prendre en compte la topographie dans un contexte 3D, avec des outils d'inversion mieux contraints que ceux des logiciels commerciaux. Il est aussi capable d'inverser simultanément des profils électriques non parallèles. Nous obtenons ainsi une image 3D de la résistivité des roches sous la zone sommitale, contraignant le volume potentiel de notre système hydrothermal.

L'approche temporelle repose sur des enregistrements d'une station Campbell CR1000 depuis Mai 2008 (pas de mesure de 5 minutes), le long d'un profil comprenant 32 capteurs PS et 25 capteurs de T°, espacés chacun d'un mètre. La réponse de ces paramètres à des événements pluvieux nous renseigne sur la dynamique des écoulements dans le système (écoulement ascendant biphasique chaud, écoulement descendant froid). Ce système est aussi caractérisé par un fort contraste de perméabilité entre la crête et les flancs.

Les écoulements convectifs (nombre de Rayleigh de 160) seront modélisés via le code COMSOL, en tenant compte de la topographie et des contrastes de perméabilité dans le milieu.

Fargier, Y. (2011). Développement de l'imagerie de résistivité électrique pour la reconnaissance et la surveillance des ouvrages hydrauliques en terre. Thèse de l'école centrale de Nantes.

### 6.2.7 (p) Petrophysical characterization of the Ringelbach (Vosges, France) research catchment

Thierry Reuschlé<sup>1</sup>, Laurence Jouniaux<sup>1</sup>, Bruno Ambroise<sup>2</sup>, Bertrand Renaudié<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Strasbourg

<sup>2</sup>LHYGES

The Ringelbach research catchment is a small basin (0.36 km<sup>2</sup>) located at Soutlzeren (Haut-Rhin), on the eastern side of the Vosges massif (North-Eastern France), with an elevation ranging from 1000 m to 750 m at the outlet. As shown by detailed geological and geophysical surveys, groundwater fluxes and storages are controlled by a relatively complex 3-D geological structure resulting from both weathering and tectonics. In order to characterize locally the whole weathering profile of the granite as conserved under the Triassic cover, two 150m-deep, totally or partly cored boreholes were drilled in 2005 at the top of the two blocks still covered by sandstone, allowing for petrophysical measurements on cores and downhole geophysical logging. We present the measurements of various physical properties (porosity, density, electrical conductivity, gas permeability, P- and S-wave velocities in dry and water saturated conditions, internal specific surface area) of rock samples from both boreholes. We look at the correlations between the various properties and propose a discussion of these correlations based on theoretical models. Electrical rock conductivity measured for different electrolytes yields the formation factor and the surface conductivity of the rock samples. When plotted against porosity, the first parameter leads to a cementation exponent close to 1.5, consistent with a porous space composed of rather large aspect ratio cracks and micro-cracks which form a well connected network. Similarly we look at the

correlation between permeability and porosity. Using a statistical crack model that allows one to estimate hydraulic properties from controlling microstructural parameters like crack aperture, crack radius and crack density, we find a power-law with an exponent quite close to the theoretical value deduced from the statistical crack model with a constant crack density and a varying crack aperture. This approach leads thus to constraints on the microstructural parameters that control groundwater fluxes in the Ringelbach catchment.

### 6.2.8 (p) Argiles gonflantes : diffusion des cations alcalins et alcalino-terreux et moteurs de l'hydratation

Fabrice Salles<sup>1</sup>, Bénédicte Prélot<sup>1</sup>, Jerzt Zajac<sup>1</sup>, Olivier Bildstein<sup>2</sup>, Henri Van Damme<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institut Charles Gerhardt, Montpellier

<sup>2</sup>CEA Cadarache, Saint Paul-lez-Durance

<sup>3</sup>Laboratoire de Physico-Chimie des Polymères et des Milieux Dispersés, Paris

Dans le cadre du stockage des déchets radioactifs, l'évaluation de la mobilité des cations compensateurs de charge dans l'espace interfoliaire est nécessaire pour élucider les mécanismes de diffusion se produisant au cours de l'hydratation et donc déterminer précisément l'impact des molécules d'eau sur l'accessibilité aux cations compensateurs. En combinant les données obtenues par isothermes d'adsorption permettant d'accéder aux surfaces spécifiques et donc à la quantité de cations réellement hydratés et les mesures de conductivité électrique, il est possible de remonter aux coefficients de diffusion des cations. Cette étude a été menée sur une montmorillonite saturée par des cations alcalins et alcalino-terreux.

Les résultats montrent que la mobilité des cations compensateurs augmente au fur et à mesure de l'hydratation pour les cations Li<sup>+</sup> et Na<sup>+</sup> présents dans l'espace interfoliaire. En effet, ces cations se détachent de la surface des feuillets lorsqu'un nombre suffisant de molécules d'eau les entourent. On observe que les cations compensateurs peuvent atteindre des coefficients de diffusion proches de celui de l'autodiffusion de l'eau ( $2.3 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s) aux fortes humidités relatives. Au contraire, les ions Cs<sup>+</sup> restent fortement attachés au feuillet puisque leur état d'hydratation est très limité. Il s'ensuit que la diffusion du Cs<sup>+</sup> n'évolue quasiment pas avec l'état d'hydratation. Le cation K<sup>+</sup> possède un comportement intermédiaire.

La comparaison de ces résultats expérimentaux avec les résultats obtenus par des calculs électrostatiques combinés avec des mesures de calorimétrie d'immersion permet de déterminer les mécanismes d'hydratation des argiles gonflantes en fonction de la nature du cation compensateur. Il apparaît alors clairement que l'hydratation des cations les plus petits (Li<sup>+</sup> et Na<sup>+</sup>) est le moteur de l'hydratation dans les montmorillonites, au contraire des cations plus gros pour lesquels l'hydratation des surfaces est prédominante.

### 6.2.9 (p) Etude de la réponse en potentiel spontané à des cycles de drainage et d'imbibition

Vincent Allègre<sup>1,2</sup>, Alexis Maineuil<sup>2,3</sup>, François Lehmann<sup>4</sup>, Fernand Lopes<sup>2</sup>, Laurence Jouniaux<sup>5</sup>, Maria Zamora<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UC Santa Cruz ; Earth & Planetary Sciences Department, États-Unis

<sup>2</sup>IPG Paris

<sup>3</sup>METIS, Paris

<sup>4</sup>LHYGES

<sup>5</sup>IPG Strasbourg

Nous présentons une étude expérimentale du potentiel spontané généré par une succession de cycles de drainage et d'imbibition dans une colonne verticale de 30 cm de haut, remplie de sable de Fontainebleau et alimentée en eau par le fond. La différence de potentiel entre deux électrodes impolarisables placées à deux hauteurs différentes (10 et 20 cm du fond de la colonne), la différence de potentiel hydraulique entre deux tensiomètres situés en vis-à-vis de ces électrodes, et la masse cumulée d'eau sortie de la colonne ont été mesurés pour trois périodes différentes (130, 260 et 380 minutes).

La différence de potentiel présente un comportement hystérétique par rapport à la différence de potentiel hydraulique et au volume d'eau extrait, dont les caractéristiques dépendent des conditions d'écoulement (drainage ou imbibition) et de la dynamique de cet écoulement.

La technique dite « ingular Spectrum Analysis » (SSA) a été appliquée aux signaux, afin d'en extraire les différentes composantes oscillantes. Elle montre que la différence de potentiel et les différences de potentiel hydraulique sont en quadrature de phase, alors que la différence de potentiel et le volume cumulé en sortie sont en phase et liés de façon linéaire.

Les observations peuvent être simulées de façon satisfaisante en ajoutant un terme semi-empirique, qui dépend du volume cumulé en sortie, dans l'équation classique de l'électrocinétique. Nous suggérons que l'interface qui se développe entre eau et air en conditions non saturées polarise, créant une réponse électrique.

### 6.2.10 (p) Influence of water pressure dynamics and fluid flow on the streaming-potential response for unsaturated conditions

Vincent Allègre<sup>1</sup>, Laurence Jouniaux<sup>2</sup>, François Lehmann<sup>3</sup>, Pascal Sailhac<sup>2</sup>, Renaud Toussaint<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UC Santa Cruz ; Earth & Planetary Sciences Department, États-Unis

<sup>2</sup>IPG Strasbourg

<sup>3</sup>Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg

Streaming-potentials are produced by electrokinetic effects in relation to fluid flow, and are used for geophysical prospecting. The coupling between the hydraulic and electrical flow in porous medium for unsaturated conditions is still not well understood. The aim of this study is to model streaming potential (SP) measurements for unsaturated conditions using an empirical approach. A conceptual model is applied to SP measurements obtained from two drainage experiments in sand. The SP data presented here shows a non-monotonous behaviour with increasing water saturation, following a pattern that cannot be predicted by existing models. The streaming potential coefficient can increase of about 10 to 40 when water saturation decreases. A model involving a quasi-static and a dynamic component is proposed to reproduce the SP measurements. The dynamic component is based on the first time derivative of the driving pore pressure. The influence of this component is investigated with respect to fluid velocity, which is very different between the two experiments. The results demonstrate that the dynamic component is predominant at the onset of drainage in experiments with the slowest water flow. If the fluid velocity is higher, the non-monotonous behaviour almost vanishes and its maximum amplitude is reduced. In this case, the dynamic pressure component is negligible. Our results suggest that fluid flow and water distribution at the pore scale have an important influence on the SP response for unsaturated conditions.

This work was supported by the French National Scientific Centre (CNRS), by ANR-TRANSEK, and by REALISE the « Alsace Region Research Network in Environmental Sciences in Engineering » and the Alsace Region.

### 6.2.11 (p) Experimental and numerical evidences of the observation of the Biot slow wave thanks to its electrokinetic conversion

Clarisse Bordes<sup>1</sup>, Stéphane Garambois<sup>2</sup>, Daniel Brito<sup>1</sup>, Michel Dietrich<sup>2</sup>, Julia Holzhauser<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau  
<sup>2</sup>ISTerre, Grenoble

As originally described by Biot in 1956, seismic propagation in fluid-filled porous media should include two longitudinal contributions : the fast and slow P waves, the latest being commonly referred to as the 'Biot slow wave'. This seismic wave has been seldom observed in natural rocks at laboratory frequencies due to its low amplitude properties and has never been recognized at seismic frequencies due to its diffusive properties. In porous media, a part of seismic energy may also be converted into electromagnetic fields by a coupling phenomenon of electrokinetic nature : the so-called seismoelectric effect. Most seismoelectric studies focus on the observation of co-seismic or depth-converted electric fields generated by the propagation of fast P-waves, mainly to detect or to image new physico-chemical contrasts. Based on Pride's theory (1994), numerical modeling of seismo-electromagnetic wave propagation suggests that the observation of the Biot slow wave could be boosted by its electrokinetic conversion, i.e. that it would be easier to record the electric fields accompanying Biot slow waves generated by a mechanical source rather than the seismic fields. In order to confirm these numerical predictions, we designed a specific laboratory experiment involving a silica sand tank excited by using a homemade pneumatic seismic source. The investigated frequency range [0.5-5kHz] contains the Biot (transition) frequency separating the diffusive from the propagation regimes of the slow wave. Numerical seismo-electromagnetic experiments were also performed at this scale to compute the seismoelectric response in homogeneous and partially saturated sand with this acquisition configuration. The comparison of these experimental data to numerical results provides new perspectives for the detection, study and potential use of the Biot slow wave.

### 6.2.12 (p) Effect of water saturation on seismoelectric coupling : A laboratory study

Clarisse Bordes<sup>1</sup>, Pascale Sénéchal<sup>1</sup>, Julien Barrière<sup>2</sup>, Daniel Brito<sup>1</sup>, Eric Normandin<sup>3</sup>, Damien Jougnot<sup>4</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau  
<sup>2</sup>European Center for Geodynamics and Seismology, Luxembourg  
<sup>3</sup>Université de Pau et des Pays de l'Adour  
<sup>4</sup>Institut des Science de la Terre, Lausanne, Suisse

Seismic waves propagating in a porous medium, under favorable conditions, generate measurable electromagnetic fields due to electrokinetic effects. It has been proposed, following experimental and numerical studies, that these so-called 'seismo-electromagnetic' couplings depend on pore fluid properties. The theoretical frame describing these phenomena are based on the original Biot's theory, assuming that pores are fluid-filled. We study here the impact of a partially saturated medium on amplitudes of those seismoelectric couplings by comparing experimental data to an effective fluid model. We have built a 1 m-length-scale experiment designed for imbibition and drainage of an homogeneous silica sand; the experimental set-up includes a seismic source, accelerometers, electric dipoles and capacitance probes in order to monitor the seismic and seismoelectric fields during water saturation. Apparent velocities and frequency spectra are derived from seismic and electric measurements during experiments in varying saturation conditions. Amplitudes of the seismic and seismoelectric waves and their ratios (i.e.

transfer functions) are discussed using a spectral analysis performed by Continuous Wavelet Transform (CWT). The experiment results reveal that the amplitude ratios of seismic to co-seismic electric signals remain rather constant as a function of the water saturation. This result show good agreement with theoretically predicted transfer functions including effective fluid properties and some recent electrokinetic models. This experiment also show the evidence of the dynamic effect in seismoelectric coupling.

### 6.2.13 (p) Seismo-electric response to various electrode arrangements

Maureen Devi<sup>1</sup>, Michel Dietrich<sup>1</sup>, Stéphane Garambois<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

Seismo-electric signals are obtained by firing a seismic source and by recording the electric fields resulting from the seismic wave propagation in fluid-filled porous or fractured media. Simple metallic rods driven into moist soil and connected as electric dipoles to a seismograph usually suffice to detect the dominant contributions of the seismo-electric response. The latter mainly represent the electric signature of seismic surface waves and guided waves propagating in the near surface. By contrast, the electromagnetic waves generated at depth are much more difficult to detect, because of their very weak amplitudes and because of the ubiquitous man-made electric noise that dominates the records. These obstacles make it difficult to use the transient electromagnetic waves for the remote detection and characterization of fluids contained in the subsurface.

In this study, we theoretically and experimentally investigate electric dipole responses in order to optimize the seismo-electric data acquisition in the field. Specifically, our goals are to i) enhance desired signals with respect to noise ; ii) obtain signals having waveforms and arrival times that can be compared to seismic measurements, for transfer function computations and for the future implementation of full waveform inversion algorithms. For this, we first use a filter theory approach to characterize the response of arrays consisting of two or more electrodes. We then use a computer code that simulates the full waveform propagation of coupled seismic and electromagnetic waves in fluid-filled stratified media to test various combinations of electrodes, notably the influence of their spacing and relative locations on the recorded waveforms. Real noise sequences recorded with a series of dipoles of various lengths and oriented in different directions are included in the numerical simulations to investigate the robustness of electrode configurations with respect to noise.

### 6.2.14 (p) Modélisation du couplage d'électrofiltration par méthode Lattice Boltzmann : étude aux concentrations extrêmes dans un chenal rugueux

Eve-Agnès Fiorentino<sup>1</sup>, Renaud Toussaint<sup>1</sup>, Laurence Jouniaux<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Strasbourg

La méthode Lattice Boltzmann est une technique de modélisation des fluides reproduisant les phénomènes de transport par advection et diffusion. Dans cette étude, un code Lattice Boltzmann couplé est implémenté de façon à résoudre à la fois la vitesse du fluide circulant dans un chenal et le potentiel électrique issu de la répartition des ions circulant à l'intérieur.

Le phénomène d'électrofiltration intervient dans de nombreux contextes et notamment dans les processus de conversion sismo-électrique. Il est caractérisé par le rapport de la différence de potentiel créée sur la différence de pression ayant généré le flux. Les résultats expérimentaux

font état d'un comportement anormal de ce rapport aux concentrations extrêmes. Nous tentons d'en rendre compte en testant des paramètres propres à générer des non linéarités.

Plusieurs tailles de pores sont testées de façon à déterminer l'effet d'un rayon comparable à la longueur de Debye, la longueur écran caractéristique du potentiel électrique dans un électrolyte. Un éventuel effet 3D est estimé par l'intégration du courant électrique sur le volume. De fortes valeurs de potentiel zeta sont testées de manière à voir si l'écart du résultat avec le calcul théorique dépend de la concentration. Enfin, plusieurs tests sont effectués dans un capillaire rugueux pour déterminer l'influence des aspérités sur le couplage.

## 6.3 Physique des zones de failles et de fractures (CNFGG)

### Responsables :

- Yves Guglielmi (CEREGE, Aix en provence)  
guglielmi@cerege.fr
- Pierre Henry (CEREGE, Aix en provence)  
henry@cerege.fr
- Claude Gout (TOTAL, Pau)  
claude.gout@total.com

### Résumé :

L'estimation des conditions physiques de réactivation des zones de failles et de fractures est un problème fondamental aussi bien pour la compréhension du cycle sismique que pour la manipulation des ressources et des fluides dans les systèmes réservoirs/couvertures profonds. Cette session a pour ambition de faire le point sur la réponse des failles (stabilité, instabilité) à une perturbation (pression, variation dynamique ou statique de contrainte) et sur les facteurs (structure, minéralogie) déterminant cette réponse. Des contributions privilégiant des approches expérimentales (in situ ou en laboratoire) pluridisciplinaires (géophysique, pétrophysique, mécanique) sont fortement encouragées pour discuter de la complexité de ces problèmes. Cette session s'intéresse aussi à comparer des expériences réalisées dans des contextes aussi différents que les glissements de terrains, les failles actives, les failles activées par des traitements industriels (forages, ouvrages géotechniques, etc.).

### 6.3.1 (o) Mechanical study of intact shale material for faults understanding - Laboratory experiments

Audrey Bonnelye<sup>1</sup>, Alexandre Schubnel<sup>2</sup>, Christian David<sup>1</sup>, Pierre Henry<sup>3</sup>, Yves Guglielmi<sup>3</sup>, Claude Gout<sup>4</sup>, Pierre Dick<sup>5</sup>

<sup>1</sup>GEC, Cergy Pontoise

<sup>2</sup>Ecole Normale Supérieure, Paris

<sup>3</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>4</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>5</sup>IRSN, Fontenay-aux-Roses

Understanding of the mechanical and physical properties of shales is of major importance in many fields such as faults hydro-mechanical behavior, cap-rock and unconventional reservoir studies or nuclear waste disposal. In particular, relationships between fluid transport properties, applied stress and textural anisotropy are critical both in intact and fractured shales. Therefore, these relations need to be investigated in the laboratory in order to have a better understanding on in-situ mechanisms. Hence, the mechanical behavior of Toarcian shale of the Tournemire underground laboratory (France) have been investigated.

In addition, conventional triaxial tests have been performed in order to determine the elasto-plastic yield envelope on three sets of samples with different orientations relative to bedding (0°, 45°, and 90° to the vertical axis). For each set, six experiments were carried out at increasing confining pressures (2.5, 5, 10, 20, 40, 80MPa). Experiments were performed in dry conditions, at a strain rate of  $5 \times 10^{-7}$  s<sup>-1</sup> up to failure. During each experiment, P and S wave elastic velocities were continuously measured along different directions, in order to see the evolution of the anisotropy of our material. What we observe is, as the confining pressure increases, the development of mechanical anisotropy, a change in dynamic elastic properties, an increase of the anisotropy of deformation. Our perspective is now to perform fluid injections, both at the field and laboratory scale and measure the evolution of hydraulic diffusivity by tracking the fluid front by both passive and active seismic measurements.

### 6.3.2 (o) Acoustic signature of multiple fracture reactivations at the meso-scale

Christophe Matonti<sup>1</sup>, Yves Guglielmi<sup>1</sup>, Sophie Viseur<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEREGE - Systèmes Sédimentaires et Réservoirs, Marseille

Fracture properties are of great importance in carbonate reservoir characterization as they are responsible of a large part of the fluid transfer properties, at all scales. It is especially true in tight reservoirs where matrix transfer properties few participate to the overall flow. Fracture diagenetical and structural evolution modifies the initial fracture properties. For instance, fracture reactivation process can enhance aperture, decrease rugosity and therefore increase permeability. However few studies have been dedicated to the in-situ geophysical characterization of fracture, as they are not trivially apprehended on classical seismic data. In this work we try to assign this problem at the « mesoscale », it means above the possible laboratory scale (about dm), and under the current seismic resolution (10-15m). For that purpose, we studied a metric paralleliped carbonate quarry bloc with a detailed structural and faciological/diagenetical characterization (fractures, karsts and stylolites digitalization along with thin section and plug porosity). It is affected by two en-échelon fracture clusters, the first one being simply formed in mode I and cemented, the second one being polyphased (shear reactivation and multiple karstification phases). We performed also 1298 acoustic P-wave velocity measurement on a vertical cross section.

It appears that Vp variation is clearly anisotropic regarding the dip angle

of the raypaths. This anisotropy is related to the fracture diagenetical evolution; indeed: - Fracture cementation leads to the obliteration of facies initial heterogeneity.

- Fracture reactivation leads to angular anisotropy, decreasing Vp about 500m/s compared to non reactivated fractures.

- Fracture karstification leads to a dramatic decrease of Vp, but slightly increase the overall Vp anisotropy.

Along with several other geophysical cross sections, this work could provide in the end, 3D petrophysical and structural carbonate analogue at subseismic scale.

### 6.3.3 (o) Etude des variations de la géométrie d'une zone de fracture expérimentale en fonction de la contrainte différentielle appliquée

Ghislain Trullenque<sup>1</sup>, Lucille Collet<sup>1</sup>, Pauline Villard<sup>1</sup>, Anne Combaud<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais

Le passage d'une onde de pression à travers un matériau géologique comme lors d'un tremblement de terre génère de hautes contraintes différentielles pendant un court intervalle de temps.

Seront présentés ici les résultats d'une série de tests de déformation en domaine cassant sur échantillons de roches. Le protocole expérimental mis en place permet d'obtenir durant quelques secondes des valeurs de contrainte différentielle exceptionnellement élevées.

L'objectif de ces recherches consiste à caractériser la géométrie de la zone de fracture sous différentes conditions de contraintes différentielles. Deux séries de tests ont été pratiqués sur des éprouvettes de gabbro, d'un diamètre de 42mm.

Le premier, dit Test Conventionnel (TC) amène la roche à la rupture en augmentant de manière progressive et en maintenant une pression de confinement constante. Le second, dit Evacuation de Pression de Confinement (EPC) consiste à amener l'échantillon proche de la rupture et relâcher subitement la pression de confinement. Cette action augmente instantanément et considérablement la contrainte différentielle appliquée sur la roche

Deux échantillons déformés respectivement selon les méthodes TC et EPC ont été tomographiés puis sectionnés de manière à obtenir une lame mince. Ces images de tomographies ont été traitées sur VGL®, Blob3D® et ImageJ® pour obtenir une visualisation 3D de la fracture. Grâce à un modèle ArcGIS® les fractures des lames minces ont été digitalisées afin de dégager leurs orientations.

La fracture issue du test TC présente un réseau de failles conjuguées, ainsi qu'un plan majeur organisé en échelons. Les échantillons déformés lors des tests EPC, montrent un seul plan de fracturation accompagné de microfractures disposées en « queue de cheval ». De plus, la largeur des fractures semblent plus importantes lors d'un test TC que lors d'un test EPC.

### 6.3.4 (o) Circulation of fluids in an activated shale fault and its consequences on hydro-mechanical properties

Mélody Lefevre<sup>1</sup>, Yves Guglielmi<sup>2</sup>, Pierre Henry<sup>1</sup>, Pierre Dick<sup>3</sup>, Claude Gout<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>CEREGE - Systèmes Sédimentaires et Réservoirs, Marseille

<sup>3</sup>IRSN, Fontenay-aux-Roses

<sup>4</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

Hydro-mechanical properties variations in relation to fault initiation and reactivation in shale are of interest to academic and industry geoscientists for the prediction and control of fluid migration (hydrocarbon, for example). This study is focused on processes at the interface between fault damage zone and fault core zone due to fluid remobilizations in the past. For this purpose, analysis and experiments are performed on a strike slip fault zone in the Toarcian shale formation, located in the underground laboratory of the French Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety (IRSN) located at Tournemire (SW France). Optical microscope and cathodoluminescence analysis revealed that during the evolution of the fault, several episodes of fluid migration occurred along the core/damage zone interface. These endogenous and/or exogenous fluids, have introduced and remobilized chemical elements that have modified the fault zone hydro-mechanical properties. Fluid flow in this very low permeability formation is enabled by a combination of processes : (i) initiation and opening of bedding parallel and low angle fractures (ii) shear induced dilatancy, (iii) brecciation and fluidization. We identify controlling geometrical parameters : (1) the structural fabric of the shale and (2) the shape of the rupture interface. Finally, we show that the shape of the permeability tensor varies with the intensity of deformation. Moreover, the reactivation of early compaction fabric may play a role in the faulting process and fluid cementation at the interface.

### 6.3.5 (o) Endommagement quasi-statique ou dynamique dans les zones de faille ? Exemple de la faille de Nojima

Anne-Marie Boullier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

Les failles matures présentent une zone d'endommagement symétrique ou non de part et d'autre du coeur de faille. Des roches pulvérisées ont été récemment observées en surface à proximité de grandes failles décrochantes intra-continentales et ont été attribuées à un endommagement dynamique lié au passage de l'onde sismique associée à une rupture sismique sur ces failles. Des expériences ont depuis confirmé cette interprétation et ont montré (1) que la pulvérisation apparaît au-delà d'un seuil de vitesse de déformation et (2) que ce seuil augmente avec le confinement. Les critères microstructuraux avancés pour caractériser les roches pulvérisées sont les suivants : (1) de nombreux gros fragments sont préservés, (2) les grains sont cassés mais leurs contours restent reconnaissables, (3) il y a peu ou pas de rotation des fragments sauf pour les plus petits, (4) la déformation est essentiellement dilatante, et enfin (5) il y a peu ou pas de cisaillement.

Tous ces résultats nous amènent à reconsidérer les microstructures classiquement attribuées à de l'endommagement quasi-statique dans les zones de failles et à trouver des critères microstructuraux pour distinguer les deux types d'endommagement. Nous revisiterons en particulier les échantillons du forage réalisé à travers la faille de Nojima après le séisme de Kobé (1995). Certains échantillons situés de part et d'autre de la faille montrent un éclatement des grains de quartz et une céméntation monophasée de laumontite indiquant une profondeur minimale de 5 km. Cette structure est celle qui se rapproche le plus de la pulvérisation. Nous avons recherché les indices de déformation (macles du Dauphiné, déformation plastique et écrasement d'inclusions fluides dans le quartz, kinks dans les biotites) et nous les comparerons aux microstructures produites lors des essais expérimentaux en dynamique ou quasi-statique. Enfin, nous discuterons des conséquences de ces observations sur l'évolution des zones de failles.

### 6.3.6 (o) Conditions et mécanismes de genèse d'instabilités de glissement dans une zone de subduction

Leslie Gadenne<sup>1,2</sup>, Hugues Raimbourg<sup>1,2</sup>, Rémi Champallier<sup>1,2</sup>, Yuzuru Yamamoto<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

<sup>4</sup>Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency For Marine-Earth and Technology, Yokohama, Japan

La compaction, la déformation et la diagenèse sont autant de processus qui modifient la rhéologie des sédiments accrétés au prisme d'accrétion ou enfouis en subduction. A l'image de ces modifications rhéologiques majeures, les mécanismes de déformation dans la partie superficielle (<40 km de profondeur) d'une zone de subduction sont multiples, du glissement aisé aux mécanismes de déformation procédant d'instabilités comme les mégaséismes ou les séismes lents.

Les relations entre les propriétés du matériau (porosité, lithologie, microstructure, pression de fluide) et son comportement mécanique sont encore mal comprises. De ce fait les mécanismes contrôlant la genèse d'instabilités sont encore débattus.

Notre étude, qui consiste en une approche expérimentale, vise à explorer de manière couplée les effets de la déformation et de la diagenèse (transformation smectite-illite) sur la genèse d'instabilités de glissement et d'en déterminer les mécanismes déclencheurs.

Pour cela nous avons réalisé des tests triaxiaux en compression sur des siltstones peu déformés provenant du paléo prisme d'accrétion de Boso (Japon). Trois séries de tests ont été réalisées pour des pressions de confinement allant de 50 à 200 MPa :

- (1) À température ambiante sur échantillons naturels - pour identifier les modes de déformation et la rhéologie des échantillons naturels de départ
  - (2) À 300°C sur échantillons naturels - pour évaluer les effets des réactions diagénétiques en cours sur la rhéologie
  - (3) À température ambiante sur échantillons naturels préalablement illitifiés expérimentalement en autoclave - pour estimer l'effet d'un enrichissement en illite sur la rhéologie de ces roches
- Les résultats d'expériences montrent que les instabilités sont uniquement générées dans les expériences conduites à 300°C (comportement de type stick-slip). Ceci indique donc que les réactions diagénétiques en cours (transition smectite-illite, déshydratation des smectites) pourraient constituer un des mécanismes source d'instabilité.

### 6.3.7 (p) Key geological factors controlling brittle structures in sandstones : A field base characterisation in south central Pyrenees, Spain

Elodie Sallet<sup>1</sup>, Vincent Hanot<sup>1</sup>, Nathanael Guilbert<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais

In order to better constrain fluid flow circulation in sands and sandstone reservoirs, understanding evolution of fault geometry and petrophysical properties is essential. In analogous reservoir, deformation produces different type of faults, which can act as barriers or conduits for fluids. This study focused on a silicoclastic analogous reservoir localised in south central Pyrenees (Spain), named the Aren group, where deformation is recorded by different type of faults. The Aren group is located on the front of the Boixol thrust, on the southern side of the San Corneli anticline. The outcrops are localised in 3 different areas, comprised between the towns of Aren, Tremp and Isona. Depending of the outcrop, we identify presence of veins, joints, deformation bands (DBs) and some few sites where both of them are recorded in the same unit.

We present a complete field study, based on two different field mapping methods : (i) field photomosaics and associated detail 2D mapping ; (ii) linear scanlines along deformed outcrops. Field measurements were completed by systematic sampling and then SEM analysis, in order to give access to : (i) microtectonic and fine characterisation of fault rock ; (ii) porosity quantification.

Correlation with previous studies of similar faulted sandstones in south of France and Utah allow us to identify the key geological factors which control initiation and evolution of faulting : (1) lithology and proportion of quartz grains versus cement, which control apparition of mode I fractures of granular crushing ; (2) burial depth and temperature history, which produce Hertzian fracturing or pressure solution processes and control the intensity of cataclase ; (3) control of previous tectonic events, which produces evolution of host rock mechanical properties.

In order to quantify the geological factors, experimental laboratory analyses (compression experiments) are in progress on host and faulted rocks corresponding to the different study area.

### 6.3.8 (p) Deciphering the kinematic of thrusts from fault rocks : Insights from AMS and paleotemperature analyses

Cristina García-Lasanta<sup>1</sup>, Antonio Casas-Sainz<sup>1</sup>, Teresa Román-Berdiel<sup>1</sup>, Belen Oliva-Urcia<sup>2</sup>, Juanjo Villalaín<sup>1</sup>, Sveva Corrado<sup>4</sup>, Chiara Invernizzi<sup>5</sup>, Luca Aldega<sup>6</sup>, Chiara Caricchi<sup>4</sup>, Cinta Osacar<sup>1</sup>, Pablo Calvín-Ballester<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Espagne

<sup>2</sup>Departamento de Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid, Espagne

<sup>3</sup>Laboratorio de Paleomagnetismo, Universidad de Burgos, Espagne

<sup>4</sup>Departamento de Scienze della Terra, Università de Roma Tre, Roma, Italie

<sup>5</sup>Departamento de Scienze della Terra, Università de Camerino, Italie

<sup>6</sup>Departamento de Scienze della Terra, Sapienza Università di Roma, Italie

A multidisciplinary approach (AMS, structural analysis, vitrinite reflectance, mixed layers illite-smectite and palaeomagnetism) is applied to the study of fault rocks to decipher fault kinematics in one of the most important thrusts related to Cenozoic deformation of the Iberian plate : the Cameros-Demanda thrust. Fault rocks along the thrust include weakly oriented breccias, deformed conglomerates and clayey fault gouge with S/C structures.

Samples for the AMS study were collected from 29 sites (434 specimens) belonging to three areas of the Cameros-Demanda Thrust. AMS results and its comparison with kinematic indicators (foliation, S/C structures and striations) indicate a complex history of movements, changing from top-to-the-NE to top-to-the-NW along the history of Cenozoic thrusting. The transport direction is either parallel to the magnetic lineation or perpendicular to the magnetic foliation, and can be checked with hectometre-scale folds, shear structures observed in thin sections and striations on the thrust surface. The results obtained indicate that AMS can give clues about the transport direction depending on the particular structures developed in each area. Temperature-susceptibility curves (40-700°C) indicate Fe sulphur, magnetite and hematite as the main magnetic carriers.

Mixed layers illite-smectite (I-S) suggest that deformation observed in the Cameros-Demanda Thrust occurred under deep diagenetic conditions (long-range ordered mixed layers I-S with an illite content of 82-86%) and fluid circulation. Vitrinite reflectance data indicate an increase of temperature toward the thrust plane likely as a result of frictional heating.

Preliminary paleomagnetic results from conglomerates suggest a complex paleomagnetic behavior, probably due to the mixing influence of pebbles. This indicates that no remagnetization related to the final movement of the fault occurred. Few paleomagnetic samples from Mesozoic rocks of the hangingwall also confirm this result.

### 6.3.9 (p) Influence of fault zone architecture on its response to variations of effective stress : estimating reactivation and dilation potential from borehole wall images, gOcad modelling and 3D-Stress calculations

Mélody Lefevre<sup>1</sup>, Yves Guglielmi<sup>2</sup>, Pierre Henry<sup>1</sup>, Sophie Viseur<sup>2</sup>, Claude Gout<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>CEREGE, Marseille

<sup>3</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

Criteria for fault reactivation is a matter of interest for seismologists in the predictions and the risk assessments of natural or induced earthquakes and for reservoir engineers in fault leakage prediction. Such studies are often performed at large scale considering simplistic representations of fault architecture and properties. In this study, we propose a method for the reconstitution of three-dimensional fault architecture and state of stress using a high-accuracy 3D numerical representation of fault zone heterogeneities at the meter scale. The studied fault zone, is located in the French Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety (IRSN) underground laboratory located at Tournemire (SW France) in the Toarcian shale formation. The fault corresponds to a few hundred meters long vertical strike-slip fault zone. Seven fully cored and wall imaged boreholes cross the intact rock, the fault damage and the gouge zones with a dip of 1°, 21°, 37° and a direction normal to the fault's strike in a volume of 20 m<sup>3</sup>. In the Fault damage zone, fractures, joints and calcite filled veins are identified as the main structures with optical logging of the borehole walls. A 3D reconstruction of these heterogeneities is conducted with gOcad. Then, a 3D gOcad model is meshed and imported in 3D-Stress software, an effective stress calculation model, to estimate the influence of different regional stress scenarios on fracture shear reactivation and opening. A key result is that the more complex the fault zone architecture, the more it is prone to develop interconnected dilatant sets of fractures under a wide range of stress conditions. Preferential flow paths for fluids can thus be activated in the fault damage zone, acting as a stress dependent drain system as well as a potential storage zone for fluids. The gOcad-3D-Stress coupling thus appears as an interesting way to estimate fault damage zone response to a change of stress and potential hydromechanical activation. Such simple analysis can also be used for borehole stability analyses, particularly in the case of horizontal holes intersecting complex fault zone architectures.

### 6.3.10 (p) Structural and petrophysical investigation of a rift border fault system : Example of the Albertine rift system

Bastien Walter<sup>1</sup>, Yves Géraud<sup>1</sup>, Marc Diraison<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GeoRessources, Nancy

<sup>2</sup>Ecole et Observatoire des sciences de la terre de Strasbourg

Understanding of extensive brittle faults and related structures is important for deep-seated resources, especially for the role of fluid barrier and/or conduit they may have in a potential reservoir. This study aims to characterize the structural and petrophysical properties of a FZ

and to compare them to those of the protolith in order to identify processes produced by the fault strain. The active Albertine Rift System (ARS), located at the northern end of the western branch of the Eastern African Rift System propagates since Upper Miocene through various precambrian metamorphic gneiss, along a former proterozoic orogenic suture. The morphology of the Albertine basin has been shaped in continental extension setting by extensive strain features in the upper crust. The ARS has subsided nearly continuously and symmetrically along two extensive boundary NE-SW fault systems, which produced a significant escarpment on both side of the basin. The southeastern margin of this rift system is a complex of steeply dipping normal faults and relay ramps. Among these normal structures, we identified a classical FZ organization along the 90-km long Toro-Bunyoro fault. Both damage zone and fault core are identified according to micro-structural observations (cohesive cataclastic texture, grain-size reduction of clasts, increase of ultra-fine matrix proportion) and the total FZ thickness is estimated at 50-100 meters. Related to these texture variations, petrophysical measurements (acoustic p-waves velocities, mercury porosimetry) show a rock strain hardening process from the protolith to the fault core. XRD analyses are performed in order to estimate the role of fluid circulation in the FZ on this process (e.g. pressure solution, precipitation). Finally, the evolution of brittle fracturing toward the fault core also identified from field analysis shows that the cataclastic process induces a reset of the brittle fracture network in the FZ. Pre-rift deformation structures are erased with the development of the cataclasis during the main rifting phase and only late- to post-rift fractures are preserved in the FZ.

## 6.4 Propriétés mécaniques et pétrophysiques des formations réservoirs et de leur environnement

### (Mechanical and petrophysical properties of reservoir rocks and their environment)

#### Responsables :

- Christian David (GEC, Cergy-Pontoise)  
christian.david@u-cergy.fr
- Sandrine Vidal (Total)  
sandrine.vidal-gilbert@total.com
- Mickaële le Ravalec (IFPEN)  
mickaele.le-ravalec@ifpen.fr

#### Résumé :

L'exploitation optimale des ressources dans les formations réservoirs, de même que le stockage de gaz à effet de serre dans des réservoirs en fin d'exploitation nécessitent d'avoir une connaissance approfondie des conditions dans lesquelles se font les circulations de fluides, des couplages thermo-hydro-mécaniques ainsi que des relations entre réservoirs et roches de couverture. Ceci est rendu possible en particulier via le développement d'études en laboratoire sur échantillons qui vont permettre d'établir les lois de comportement des milieux poreux et des roches de couverture aux conditions in situ durant la phase de production ou en phase d'injection de CO<sub>2</sub> post-production. Ces lois alimentent les simulateurs réservoirs couplés aux simulateurs géomécaniques et se doivent donc d'être aussi fiables que possible. Cette session a pour objectif de favoriser les échanges entre expérimentateurs et modélisateurs travaillant dans la caractérisation des réservoirs et de leur environnement à différentes échelles spatiales (de la microstructure à celle de la formation géologique) et temporelles (de la production au stockage à long terme), et se propose de présenter les avancées les plus récentes sur le rôle de la déformation (localisée ou diffuse) sur les propriétés de transport dans les réservoirs et l'intégrité des roches de couverture, dans la prise en compte de l'anisotropie et de l'hétérogénéité dans les formations, des effets d'échelles et de couplages multiples entre les phases fluides et solides aux conditions in situ..

#### Mots-clés :

Géomécanique, pétrophysique, roches réservoirs, roches de couverture, couplage thermo-hydro-mécanique, anisotropie, hétérogénéité.

#### 6.4.1 (o) Inverse modeling of stress from well data in a reservoir containing mechanical heterogeneities

Marianne Conin<sup>1</sup>, Guillaume Caumon<sup>1</sup>, Richard Giot<sup>1</sup>, Antoine Mazuyer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GeoRessources, Nancy

Stress estimation in a reservoir is a fundamental task to assess the interaction between rock and fluids (hydrofrack, fault reactivation, fluid circulation). In homogeneous media, dimly anisotropic and dimly deformed, regional stress can be estimated from present day loading conditions (gravity and tectonic far-field loading). Those estimates become unreliable when the media contains anisotropies or mechanical heterogeneities which modify significantly the local state of stress. This work aims at estimating the effect of these heterogeneities on the state of stress.

At first we model stresses in a benchmark grid containing a fault and 3 folded layers of known mechanical properties, a given far field loading, and a series of wells providing measurements of stress (orientation and magnitude). This first step is to map the local variations of stresses around discontinuities, and quantify the effects of each discontinuity as well as the combine effects of several discontinuities on the state of stress. This is made with a finite element code The second step is to invert stress data measured in the wells to constrain the mechanical properties of each discontinuity. Results provide a characterization of the mechanical compartmentalization of the reservoir, and a prediction of the mechanical response of the reservoir to a new drill site or a change in the mechanical properties of a discontinuity.

#### 6.4.2 (o) Mechanical behavior of low porosity carbonate rock : From a brittle behavior to a ductile one

Aurélien Nicolas<sup>1</sup>, Jérôme Fortin<sup>1</sup>, Yves Guéguen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LGE, Paris

Mechanical compaction and associated porosity reduction play an important role in the diagenesis of porous rocks. They may also affect reservoir rocks during hydrocarbon production, as the pore pressure field is modified. This inelastic compaction can lead to subsidence, cause casing failure, trigger earthquake, or change the fluid transport properties. In addition, inelastic deformation can be time-dependent. In particular, brittle creep phenomena have been deeply investigated since the 90s, especially in sandstones. However knowledge of carbonates behavior is still insufficient.

In this study, we focus on the mechanical behavior of a 14.7% porosity white Tavel (France) carbonate rock (>98% calcite). The samples were deformed in a triaxial cell at effective confining pressures ranging from 0 MPa to 85 MPa at room temperature and 70°C. Experiments were carried under dry and water saturated conditions in order to explore the role played by the pore fluids. Three types of experiments have been carried out : (1) a first series in order to investigate the rupture envelopes, (2) a second series with creep experiments and (3) a third one with stress relaxation experiments. During the experiments, elastic wave velocities (P and S) were measured to infer crack density evolution. Permeability was also measured during creep experiments. Our results show two different mechanical behaviors : (1) brittle behavior is observed at low confining pressures, whereas (2) ductile behavior is observed at higher confining pressures. During creep experiments, these two behaviors have a different signature in term of elastic wave velocities and permeability changes, due to two different mechanisms : development of micro-cracks at low confining pressures and competition between cracks and microplasticity at high confining pressure.

#### 6.4.3 (o) Propriétés mécaniques et microstructures des roches carbonatées poreuses : le rôle des ciments et des hétérogénéités du milieu poreux

Jean-Baptiste Regnet<sup>1</sup>, Christian David<sup>1</sup>, Jérôme Fortin<sup>2</sup>, Philippe Robion<sup>1</sup>, Pierre-Yves Collin<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>GEC, Cergy Pontoise

<sup>2</sup>LGE, Paris

<sup>3</sup>Biogéosciences, Dijon

La vitesse de propagation des ondes P dans la formation de l'Oolithe Blanche (Grainstone Oolithique, Jurassique Moyen, Bassin de Paris) est très largement contrôlée par la structure de l'espace poreux (porosité annulaire ou uniforme dans les grains ; Type A) et par la présence ou l'absence d'un ciment isopaque autour des grains (Type B) (Makhloufi et al., 2013 ; Casteleyn et al., 2010, 2011).

Plusieurs essais de déformation triaxiale ont été réalisées sur des échantillons de Type A et B afin d'investiguer le rôle de telles microstructures sur la réponse mécanique des roches carbonatées poreuses. Cette étude est essentielle à la compréhension générale de l'Oolithe Blanche, qui présente un fort potentiel géothermique et représente une cible potentielle pour la séquestration de CO<sub>2</sub>.

Les essais ont été réalisés à deux conditions initiales différentes : (1) Une pression de pore de 5 MPa et une pression de confinement de 28 MPa couplées à une température de 55°C pour les échantillons de Type A afin de recréer les conditions réservoirs de l'Oolithe Blanche au centre du bassin. (2) une pression de pore de 0,5 MPa et de confinement de 1,5 MPa pour les échantillons de Type B. Les échantillons comparés présentent des textures et faciès équivalents, ainsi que des propriétés pétro-physiques très proches (porosité, perméabilité).

Deux comportements distincts sont mis en évidence :

Type A : les échantillons avec une microporosité uniforme dans les grains ont un comportement ductile, tandis que les échantillons à porosité annulaire sont caractéristiques du domaine fragile.

Type B : les échantillons avec des ciments isopaques autour des grains ont un comportement fragile. En revanche, les échantillons dépourvus de tels ciments présentent un comportement mécanique relevant plus du domaine ductile.

Ces résultats montrent que les structures de porosité et les ciments jouent un rôle important sur la réponse mécanique des roches carbonatées poreuses.

#### 6.4.4 (o) Caractérisation expérimentale, modélisation, et impact sur la perméabilité, des couplages adsorption-déformation dans des échantillons de charbon en présence de CO<sub>2</sub>

David Espinoza<sup>1</sup>, Matthieu Vandamme<sup>2</sup>, Jean-Michel Pereira<sup>2</sup>, Patrick Dangla<sup>2</sup>, Sandrine Vidal-Gilbert<sup>3</sup>

<sup>1</sup>The University of Texas at Austin, États-Unis

<sup>2</sup>Laboratoire Navier, Champs sur Marne

<sup>3</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

La réponse réservoir des veines de charbon à une récupération primaire ou assistée de méthane est fortement influencée par les phénomènes d'adsorption/désorption et les déformations qu'ils engendrent. En effet, ceux-ci induisent des variations d'ouverture des fractures naturellement présentes dans le réservoir, qui se traduisent par des variations de perméabilité de plusieurs ordres de grandeur. Dans la présente étude, nous réalisons des expériences de compression triaxiale sur des échantillons

cylindriques de charbon sub-bitumineux injectés par du CO<sub>2</sub>. Ces expériences nous permettent de mesurer les propriétés poromécaniques des échantillons en cours d'injection. Leurs propriétés adsorptives sont mesurées également. Les données expérimentales obtenues permettent de calibrer un modèle de comportement poromécanique.

Le modèle poromécanique en question, développé pour l'étude, prend en compte de manière thermodynamiquement cohérente les gonflements de la matrice de charbon induits par l'adsorption de fluide dans les micropores de cette matrice. Il considère également l'existence, au sein du réservoir, de deux porosités à des échelles différentes : les micropores de la matrice de charbon, et les fractures naturellement présentes. Une des originalités du modèle réside dans le fait que, au lieu de nous focaliser sur les gonflements induits par l'adsorption, nous nous intéressons aux pressions générées par cette adsorption.

Le modèle calibré est ensuite validé sur un nouveau jeu d'expériences. Nous montrons notamment que, en cours d'injection de CO<sub>2</sub>, les développements de contraintes et pertes de perméabilité observés expérimentalement peuvent être correctement prédits.

#### 6.4.5 (o) Effets d'une injection de fluide à très faible pression sur une roche peu consolidée sous contrainte critique

Romarc Macault<sup>1,2</sup>, Christian David<sup>1</sup>, Jérémie Dautriat<sup>2</sup>, Joel Sarout<sup>2</sup>, Jérôme Wassermann<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEC, Cergy Pontoise

<sup>2</sup>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Perth, Australie

Une étude expérimentale a été menée afin de caractériser les effets induits par les fluides sur le comportement mécanique d'un grès faiblement consolidé et lité. Différentes contraintes ont été appliquées et un système de surveillance acoustique actif et passif a été utilisé. Deux expériences d'injection (eau et huile Fluorinert) ont été réalisées dans des échantillons de grès de Sherwood (provenant de la baie de Ladram au Royaume Uni) mis sous contrainte critique pour analyser l'affaiblissement mécanique.

Une contrainte déviatorique correspondant à 80% de la résistance à la compression uniaxiale du grès étudié (valeur déterminée préalablement) a été appliquée à un échantillon sec confiné à 5 MPa avant l'injection de fluide à 0,5 MPa. Des capteurs de déformations axiale et radiale ainsi que 16 capteurs acoustiques étaient déployés pour suivre l'évolution des propriétés mécaniques et élastiques et l'activité microsismique. La cinématique et la forme du front de saturation du fluide injecté sur des échantillons non contraints ont aussi été étudiées grâce à des capteurs acoustiques et des techniques de CT scan.

La propagation du fluide dans la roche provoque un affaissement de l'échantillon avec un taux de déformation plus élevé en présence d'eau. Les injections se différencient surtout par l'apparition d'un fort endommagement dans le cas de l'eau non observée avec l'huile. De plus, la vitesse des ondes P varie différemment selon le fluide injecté (diminution pour l'eau et augmentation pour l'huile). Des mécanismes d'atténuation associés à des fréquences critiques impacteraient significativement les propriétés acoustiques de la roche en présence d'eau. L'analyse des émissions acoustiques et de l'imagerie CT scan obtenue après l'expérience converge vers l'interprétation d'une fissuration en présence d'eau. Une méthode utilisant la théorie des rais et un modèle de vitesse tabulaire a été utilisée pour la localisation de la microsismicité afin de rendre compte de l'hétérogénéité du milieu.

#### 6.4.6 (o) Caractérisation des propriétés pétrophysiques des grès du Buntsandstein (Graben du Rhin Supérieur)

Sébastien Haffen<sup>1</sup>, Yves Geraud<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GéoRessources, Nancy

Le réservoir gréseux du Buntsandstein (Trias inférieur), localisé dans le fossé Rhénan, associe une formation argilo-gréseuse à une anomalie thermique régionale. Ainsi, il apparaît comme une cible intéressante pour l'industrie géothermique. La stratégie d'implantation de doublets injection/production se faisant sur la base d'une bonne connaissance des propriétés de transfert de fluides et chaleur dans la formation, il est important de caractériser finement ses propriétés pétrophysiques. Carotté en continu au travers de la formation, le forage EPS1 (Soultz-Sous-Forêts) permet d'apprécier la dispersion des valeurs des mesures (porosité : 1,21-19,93 %, perméabilité : 0,34-518 mD, vitesse de propagation des ondes P : 2000-5250 m.s<sup>-1</sup> (sec) et 3223-5556 m.s<sup>-1</sup> (saturé à l'eau), conductivité thermique : 2,08-5,22 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> (sec) et 2,21-5,95 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> (saturé à l'eau). La forte hétérogénéité est induite par cinq faciès pétrographiques qui se répartissent en proportion variable dans les principaux faciès sédimentaires rencontrés. A partir du profil de température, mesuré à l'équilibre dans le forage EPS1, et de mesures de conductivité thermique sur les carottes, les zones de circulation de fluides dans la formation gréseuse du Buntsandstein sont déterminées. En intégrant les données de fracturation acquises sur les analogues de surface, un modèle géologique 3D d'un bloc structural est construit. Des modélisations numériques réalisées à l'aide de *Thought2* cherchent à reproduire le profil de température mesuré en puits. Elles soulignent la nécessité d'une bonne connexion de ces corps sédimentaires perméables avec les failles qui délimitent les blocs structuraux et d'un basculement tectonique de quelques degrés de ces blocs pour permettre l'établissement des circulations. Ces données montrent l'importance de l'héritage géologique (sédimentologique et structural) sur la dynamique des fluides et constituent ainsi un guide pour l'implantation de futurs puits géothermiques.

#### 6.4.7 (p) Influences respectives de la sédimentation et de la diagénèse sur les propriétés physiques et la fracturation de différents types de craie, Cap Blanc Nez, France

Ophélie Fay Gomord<sup>1</sup>, Francis Amédéo<sup>2</sup>, Bruno Caline<sup>3</sup>, Fanny Descamps<sup>4</sup>, Eric Lasseur<sup>5</sup>, Pierre Vanlandschoot<sup>4</sup>, Sara Vanduycke<sup>4</sup>, Rudy Swennen<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Katholieke Universiteit Leuven, Heverlee, Belgique

<sup>2</sup>Biogéosciences, Dijon

<sup>3</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>4</sup>Université de Mons, Belgique

<sup>5</sup>BRGM, Orléans

Depuis la découverte d'hydrocarbures dans des réservoirs crayeux à la fin des années soixante, la craie a été largement investiguée. Cependant, la connaissance des propriétés des craies de mauvaise qualité réservoir, dites craies compactes, est souvent encore balbutiante. Afin de combler cette lacune, des études simultanées de la sédimentologie, la pétrographie, du réseau de fracturation des propriétés pétrophysiques ou géomécaniques de différents types de craies ont été entreprises en vue de corréler les divers facteurs caractéristiques de chaque craie compacte. Plusieurs affleurements ont fait l'objet d'un échantillonnage sériel, en particulier les craies cénomaniennes et turonniennes du Boulonnais. Ces craies présentent en effet une grande diversité de lithologies crayeuses et une fracturation significative de par leur histoire tectonique.

Une étude multi-échelles et pluridisciplinaire permet de déterminer l'influence respective des paramètres géologiques, à savoir la sédimentation et la diagénèse, sur la formation de différents types de craies compactes ainsi que leurs impacts sur les caractéristiques microtexturales, pétrophysiques et géomécaniques. Les caractéristiques géologiques et physiques des différentes craies seront interprétées en lien avec le type et l'intensité de la fracturation mesurée sur l'affleurement. Cette étude devra permettre au final une compréhension plus globale des craies compactes et leurs relations avec la fracturation dans les réservoirs crayeux.

#### 6.4.8 (p) Anisotropy of petrophysical properties for a set of porous rocks derived from magnetic, elastic and electrical properties

Philippe Robion<sup>1</sup>, Christian David<sup>1</sup>, Jérémie Dautriat<sup>2</sup>, Pierre-Yves Collin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*GEC, Cergy Pontoise*

<sup>2</sup>*CSIRO, Earth Science and Resource Engineering, Perth, Australia*

<sup>3</sup>*Biogéosciences, Dijon*

Anisotropy has become a major issue in geophysical studies at different scales. In particular for geophysical prospecting it provides a powerful method to analyze rock physics attributes in reservoirs or in complex tectonic settings. We used a fully automated device designed to work with cylindrical samples cored in three orthogonal directions, which gives a significant gain both in the number of measurements involved and in sample preparation achieved compared to measurements on spheres. This new setup is able to achieve a direct comparison between the anisotropy of elastic properties and the anisotropy of electrical properties. We applied our methodology on different types of rocks (sandstones and carbonates) with different porosity values (10-30%) and permeability (1mD to 1D) for which we were able to compare the anisotropy of magnetic, elastic and electrical properties in a unified scheme. These anisotropies were related to structural and microstructural attributes derived from the ferrofluid impregnation technique, that is, combined with anisotropy of magnetic susceptibility measurements (ASM<sub>f</sub>), one of the ways to analyze the 3-D geometry of the pore space and to infer indirectly the anisotropy of permeability. Our directional data set highlights the good agreement between AMS<sub>f</sub>, Anisotropy of P-wave Velocity (APV) and Anisotropy of Electrical Conductivity (AEC) methods. This is a strong argument to say that the anisotropy of the porosity revealed by the three approaches is mainly driven by the coarse fraction of porosity. As rule of thumbs, the long axis of the porosity corresponds roughly to the maximum velocity direction and to the maximum electrical conductivity direction. To control the pore aspect ratio we used the APV measured on samples in dry and water saturated conditions. For carbonates, due probably to an intricate distribution of microstructures, the aspect ratios obtained show significant discrepancies between both methods. A key issue for the applicability of the AMS<sub>f</sub> method is a successful impregnation limited by the size of magnetic nanoparticles (10 nm) in suspension in the ferrofluid. We are now working on the possibility to supplement this approach with electrical measurements in order to infer precise and reliable aspect ratio of the porosity.

## 6.5 Apports de la pétrophysique dans la caractérisation des réservoirs sédimentaires : applications aux systèmes carbonatés

### Responsables :

- Philippe Robion (GEC, Cergy-Pontoise)  
philippe.robion@u-cergy.fr
- Pierre-Yves Collin (Biogéosciences, Dijon)  
pierre-yves.collin@u-bourgogne.fr

### Résumé :

Les réservoirs contenus dans les formations sédimentaires carbonatées sont des ensembles présentant des hétérogénéités pétrophysiques complexes difficilement prédictibles. Ces hétérogénéités dont on observe actuellement seulement l'état final sont le résultat de différents mécanismes et processus mis en jeu à différentes échelles de temps et d'espace. Ces hétérogénéités dépendent (1) de la variété des caractéristiques sédimentologiques (faciès, textures par exemple) qui constituent un paramètre initial et figé du réservoir, (2) de l'ensemble des processus diagénétiques (dont l'évolution de la matière organique) mis en jeu dès le dépôt du sédiment (soit le remplissage sédimentaire), jusqu'à l'état actuel du réservoir, largement relié à l'histoire des circulations des fluides dans le réservoir et à la nature de ces fluides, (3) de la possible fracturation venant se surimposer aux deux paramètres précédents et enfin (4) de l'histoire tectonique à grande échelle qui façonne les couches (failles, plis).

Une des conséquences est par exemple la difficulté d'appliquer les lois simples reliant la porosité avec les propriétés élastiques et les vitesses sismique classiquement utilisées pour reconstruire la géométrie des corps sédimentaires à l'échelle du réservoir. L'objectif de cette session est de montrer comment la physique des roches peut faire le lien entre les données sédimentologiques et une meilleure caractérisation de l'architecture des réservoirs carbonatés. Plusieurs thèmes pourront être abordés avec par exemple :

- 1) la caractérisation de la distribution des vides, porosité, cracks, fractures, etc.,
- 2) les relations entre porosité, perméabilité et conductivité électrique et (ou) toute(s) autre(s) propriété(s) pouvant caractériser l'écoulement dans les roches sédimentaires,
- 3) les relations entre les propriétés physiques et propriétés acoustiques (ondes P, S, atténuation, anisotropie, etc.),
- 4) les relations entre les propriétés physiques et les changements d'échelle d'observation.

Les contributions attendues émanant d'un large spectre de spécialité (sédimentologie, pétrophysique, tectonique, géomécanique, géophysique) et touchant à au moins un des thèmes précédents pourront concerner des analogues de terrain, des données de puits ou bien encore des données sismiques dans les domaines pétrolier, du stockage, de la géothermie ou encore des ressources en eau.

### 6.5.1 (o) Acoustic & reservoir properties of microporous carbonate rocks : implication of micrite particle size and morphology

Jean-Baptiste Regnet<sup>1</sup>, Christian David<sup>1</sup>, Philippe Robion<sup>1</sup>, Jérôme Fortin<sup>2</sup>, Benjamin Brigaud<sup>3</sup>, Beatrice Yven<sup>4</sup>

<sup>1</sup>GEC, Cergy Pontoise

<sup>2</sup>LGE, Paris

<sup>3</sup>GEOPS, Orsay

<sup>4</sup>ANDRA, Paris

Micritic limestones exhibit large variation of (1) sedimentary texture from mudstone to packstone, (2) facies composition and (3) petrophysical properties (porosity, acoustic velocity). Those heterogeneities imply a complex distribution of fluid flow properties and a complex petrophysical signature. In the Eastern Paris Basin, Late Jurassic micritic carbonate deposits constitute a main aquifer located directly above the Callovian-Oxfordian clay-rich formation studied by the French National Radioactive Waste Management Agency (Andra) as a potential host rock for a deep geological disposal of high level radioactive wastes. A precise understanding of the factors controlling the petrophysical properties within carbonate aquifers is thus essential for rock-typing studies and fluid flow modelling. The first objective of this study is to better characterize the vertical distribution of both petrographical characteristics (texture, facies and composition) and petrophysical properties (porosity, permeability and acoustic velocity) on about 100 plugs sampling along 230 m of cores in well EST205, located at the top of the Underground Research Laboratory at Bure, France. The secondary aim is to better understand the influence of micrite type on acoustic velocity-porosity relationships by a rock typing approach. Most of the samples are (1) oncoid-peloid packstones (45 samples, n=45) and (2) bioclastic wackestones (n=25), both deposited in low energy environmental settings. Oolitic grainstone facies are not well-developed in these limestones (n=14) and macroporosity is absent. SEM observations reveal 3 micrite particle types both in matrix and clasts. (1) Fine (~ 1 μm) rounded micrites with very punctate inter-crystalline contacts, (2) Fine to coarse (1 μm ? 2 μm) subrounded micrite particles with partially coalescent contacts and (3) coarse (> 2 μm) anhedral crystals with sutured contacts (mostly indistinct) forming a dense and fused matrix. Types 1 and 2 are observed in porous levels (15 - 25% porosity) and display low to moderate P-wave velocities (3000 to 4500 m/s) whereas type 3 is observed in very low to non-porous units (< 10% porosity) and display high P-wave velocities (5000 to 6000 m/s).

### 6.5.2 (o) Les nanostructures de la Craie (Crétacé supérieur, bassin de Paris) : origine de l'hétérogénéité des propriétés réservoirs ?

Jessica Saiag<sup>1</sup>, Pierre-Yves Collin<sup>1</sup>, Jean-Pierre Sizun<sup>1</sup>, Eric Lasseur<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Biogéosciences, Dijon

<sup>2</sup>Laboratoire Chrono-environnement, Besançon

<sup>3</sup>BRGM, Orléans

Environ 2/3 des réserves mondiales en hydrocarbures sont contenues dans des réservoirs carbonatés. Parmi ces derniers, la Craie constitue un réservoir microporeux déjà largement exploité en Mer du Nord. La Craie a longtemps été considérée comme une formation uniforme, cependant elle présente une très grande variabilité de faciès et de géométries notamment dans le Bassin anglo-parisien en Haute Normandie entre le Havre et Dieppe. Dans ce secteur, les porosités varient de 8 à 45% pour des perméabilités allant de 0,01 à 500 mD. Ces fortes hétérogénéités pétrophysiques résultent de différents mécanismes sédimento-diagénétiques. L'objectif de cette étude est de comprendre les facteurs

contrôlant ces hétérogénéités afin d'optimiser la modélisation de ce type de réservoir. Le caractère microporeux de la Craie nécessite de mener l'étude à toutes les échelles d'observation : macroscopique, microscopique et surtout nanoscopique. A cette échelle, les études se font au Microscope Electronique à Balayage (MEB) en électrons secondaires, le plus souvent sur esquille, ce qui permet l'observation en trois dimensions de la nanostructure de la roche. La nanostructure regroupe la morphologie et l'agencement des grains constituant la roche à l'échelle du micron. Les nanostructures des micrites sont décrites depuis 1970, et la dernière étude en date (2011) en propose une classification. Cependant, aucune étude de la nanostructure de la Craie n'est à ce jour définie, bien que la plupart des publications sur la Craie présentent des photographies MEB. Ainsi, le but de cette étude est dans un premier temps de réaliser une classification des nanostructures de la Craie. La compréhension de l'origine sédimentaire et/ou diagénétique de la diversité de ces nanostructures fera l'objet d'une seconde partie de l'étude. Enfin, nous identifierons dans quelle mesure des différences de nanostructures sont à l'origine de l'hétérogénéité des propriétés réservoirs de cette formation.

### 6.5.3 (o) Utilisation de la micro-tomographie dans la caractérisation d'un réservoir carbonaté microporeux. Cas de la Formation de l'Oolithe Blanche (Bathonien, bassin de Paris)

Yasin Makhoulouf<sup>1</sup>, Steven Claes<sup>2</sup>, Pierre-Yves Collin<sup>3</sup>, Françoise Bergerat<sup>1</sup>, Christian David<sup>4</sup>, Béatriz Menendez<sup>4</sup>, Philippe Robion<sup>4</sup>, Jean-Pierre Sizun<sup>5</sup>, Rudy Swennen<sup>2</sup>, Christophe Rigollet<sup>6</sup>

<sup>1</sup>iSTeP, Paris

<sup>2</sup>KU Leuven, Leuven, Belgique

<sup>3</sup>Biogéosciences, Dijon

<sup>4</sup>GEC, Cergy Pontoise

<sup>5</sup>Laboratoire Chrono-environnement, Besançon

<sup>6</sup>SGS Horizon Oil, Gas & Chemical Services, Den Haag, Pays-Bas

La Formation de l'Oolithe Blanche (Bathonien) est un des aquifères salins profonds du bassin de Paris. Des études réalisées dans le cadre de recherche sur la faisabilité du stockage de CO<sub>2</sub> ou pour la géothermie, ont démontré que les propriétés réservoirs de cette formation sont plus difficiles à prédire que ce qui était envisagé. Pour caractériser cette formation en termes de qualité réservoirs trois sites d'études ont été sélectionnés : la bordure sud-est du bassin où la formation affleure dans les carrières de Bourgogne, la partie médiane (secteur Champagne) et la partie centrale, activement exploitée pour la géothermie et ce depuis une cinquantaine d'années.

Le réservoir présente une importante microporosité intraparticulaire (>90% de la porosité). Les rares occurrences de méso- et macroporosité interparticulaires participent peu aux propriétés réservoirs et sont reliées au système poreux par la microporosité. La tomographie micro-focus rayons-X à haute résolution assistée par ordinateur (μCT-scan) est une technique novatrice et non destructive permettant d'imager la structure interne d'un objet opaque. Les images générées par cette méthode sont des sections transverses de l'objet par mesure de l'atténuation d'un faisceau de rayons-X. Cette méthode permet d'imager et de caractériser le réseau micro- et macroporeux intra- comme interparticulaire, en 3D. De plus, il est possible, après reconstruction des volumes 3D, de mettre en évidence la présence ou l'absence de zones de connectivité entre ces différents réseaux poreux.

Couplée aux mesures pétrophysiques (Φ, K) et à l'analyse pétrographique (granulométrie, interpénétration), la création de carte de connectivité du réseau poreux permet d'illustrer la complexité de ce dernier. Nos premiers résultats soulignent l'importance de la microstructure et

de l'agencement des grains dans la connectivité du réseau poreux. Enfin, cette étude apporte une meilleure compréhension des hétérogénéités de perméabilité observées au sein de roches réservoirs microporeuses.

### 6.5.4 (o) Characterization and origin of permeability-porosity heterogeneity in shallow-marine carbonates : from core scale to 3D reservoir dimension (Middle Jurassic, Paris Basin, France)

Benjamin Brigaud<sup>1</sup>, Benoît Vincent<sup>2</sup>, Christophe Durllet<sup>3</sup>,  
 Jean-François Deconinck<sup>3</sup>, Emmanuel Jobard<sup>4</sup>, Béatrice Yven<sup>5</sup>,  
 Philippe Landrein<sup>5</sup>

<sup>1</sup>GEOPS, Orsay

<sup>2</sup>Cambridge Carbonate, Marey-sur-Tille

<sup>3</sup>Biogéosciences, Dijon

<sup>4</sup>Captair, Dijon

<sup>5</sup>ANDRA, Chatenay Malabry

Nuclear magnetic resonance (NMR), stable isotope geochemistry on micro-drilled core samples, NMR well-logs and 3D modeling are used to investigate the carbonate permeability-porosity heterogeneity along 230 m-thick limestones of the Paris Basin. Despite the global low porosity and permeability of the limestones, two aquifers units with porosity greater than 15% were identified. These two aquifers are very different in terms of pore through radii and NMR signal. The first one (A1 : Aquifer 1) is a 7 m-thick mudstone unit, dominated by extended microporosity with pore throat radii of 0,25  $\mu\text{m}$  to 0,3  $\mu\text{m}$ . The second one (A2 : Aquifer 2) is a 15 m-thick oolitic grainstone units showing macropores reaching 100  $\mu\text{m}$  and pore throat radii of 32  $\mu\text{m}$ . From core descriptions and wireline logs on 26 wells, a 3D static geological model is build. The fine tuning of permeability calculations from NMR logs realized along 12 of the wells, allows porosity and permeability heterogeneity to be distributed within a 3D model at the reservoir scale (area of about 2000 km<sup>2</sup>) which match the flow behavior illustrated by well tests.

Associated with early meteoric calcite cements and poorly developed burial blocky calcite cements, the porous and permeable intervals may be predicted in two stratigraphic and diagenetic considerations. Firstly, the syn-sedimentary meteoric dissolution or neomorphism of the initial high magnesium calcite and aragonite particles or clasts into low magnesium calcite particles or cements prevented most mechanical and chemical compaction during the first steps of burial. Secondly, the regional stratigraphic architecture reveals the presence of local permeability barriers, which prevented Early Cretaceous lateral meteoric water circulation and the associated burial calcite cementation.

### 6.5.5 (o) Paleostress patterns associated to a sand injection system : microstructural and AMS evidences of stress rotations during sand injection processes ? (SE Basin, SE France)

Caroline Mehl<sup>1</sup>, Philippe Robion<sup>2</sup>, Bénédicte Cauquil<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centre de Géosciences, École nationale supérieure des mines de  
 Paris, Fontainebleau

<sup>2</sup>GEC, Cergy Pontoise

<sup>3</sup>CGG International, Paris

Understanding the way low-permeability rocks fracture within space and time is a challenging aim in several applied problems, such as industrial hydraulic fracturing processes. The turbiditic system of the Vocontian Basin offers a unique opportunity to follow the way the apto-albian

Blue Marls formation deforms : the early fracture network is indeed filled with sandy injections that constitute markers of early deformation in the host rock.

We performed complementary studies to reconstruct the fracturing history of this marly host rock. This first studies were focused on the Bevens Hill (SE Basin, France). The macroscopic organization of the structures was deduced from mapping thanks to differential GPS. Map was completed by the analysis of paleostress in marls by both a classical microstructural studies on joints, veins and faults kinematics and by AMS analyses. An attempt to access the magnetic fabric into sand injections was equally done. Particular attention was paid on relationships between injections and faults, and especially timing between the fracturing and injection processes.

AMS data, together with kinematic analysis of fault sets, put forward a clockwise rotation of the compression axes from N340 to N060 in the Blue Marls formation. The first increments of deformation are deduced from AMS data in the limy beds of the hostrock, but are not recorded at macroscopic scale. N/S to N060 successive compressions induce incremental fracturing of the hostrock, characterized by successive conjugate superimposed strike slip fault patterns. Field evidences revealed two successive pulses of sand injections : a first one filling N060 fractures and a second one filling the N130 fractures. The first injection process was synchrone to the third increment of compression (s1 striking N030). Some field evidences attest for a persistency of movement on N130 striking dextral faults syn to post injection of the N060 fracture set. The second pulse of injection then fulfilled the N130 set. Ongoing rotation of compression axes then induce the last fault planes responsible for offset of both the injection systems.

### 6.5.6 (p) Propriétés élastiques des carbonates de type MCO3 : Etude par dynamique moléculaire

Brahim Benazzouz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau

L'étude des propriétés structurales et mécaniques des roches carbonatées est un sujet qui intéresse plusieurs domaines d'ingénierie. Les roches carbonatées sont parmi les principaux constituants des réservoirs pétroliers. Dans ce travail, des simulations de type dynamique moléculaire basées sur la technique de minimisation de l'énergie ont été réalisées sur des structures cristallines des roches carbonatées afin de mieux comprendre leurs propriétés élastiques. Un potentiel interatomique approprié est utilisé pour décrire leurs structures de type rhomboédriques et orthorhombiques.

A la pression atmosphérique, plusieurs propriétés ont été évaluées, y compris les constantes élastiques, module de rigidité, module de Young et les vitesses des ondes transverses et longitudinales. Par la suite, nous avons étudié l'effet d'une contrainte géologique appliquée sur les propriétés structurales et mécaniques de ce type de roches allons jusqu'à 1 GPa, ce qui représente une profondeur de plus de 10km. Notons que certaines de ces propriétés sont mal évaluées.

### 6.5.7 (p) Vibrométrie laser pour la caractérisation des roches réservoirs

Valier Poydenot<sup>1</sup>, Clarisse Bordes<sup>1</sup>, Daniel Brito<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau

La reproduction en laboratoire d'expériences de géophysique représente un enjeu particulièrement important, permettant de faire le lien entre les modèles numériques et l'exploitation des données de terrain. Dans

cet objectif, nous avons développé un banc de vibrométrie laser permettant d'acquérir des données sismiques sans contact, donc sans problème de couplage. Basé sur le principe de l'interférométrie laser, cette technique nous permet d'accéder à des déplacements de surface aussi faibles que le dixième de nanomètre pour des fréquences allant de la centaine de kilohertz à quelques mégahertz. Un contrôle micrométrique du positionnement laser permet d'obtenir une grande densité de points de mesure. Lors de cette communication, nous présenterons le principe de cette technique novatrice et montrerons sa potentialité pour la caractérisation haute résolution des hétérogénéités et éventuellement de l'anisotropie des carbonates.

### 6.5.8 (p) High density ultrasonic characterization of carbonates heterogeneities

Dawin Baden<sup>1</sup>, Yves Guglielmi<sup>1</sup>, Ginette Saracco<sup>2</sup>, Lionel Marié<sup>1</sup>,  
Sophie Viseur<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*CEREGE, Marseille*

<sup>2</sup>*CEREGE, Aix-en-Provence*

Characterization of heterogeneities within carbonate rocks remains a key challenge in Oil Industry and for Carbon Geological Storage as well. During CGS operations, heterogeneities have significant impact on fluid flows at near well environment and within the reservoir especially when convective mixing occurs. In this study, we conducted experiments on different sections of a 20 m long and 125 mm wide carbonate core. Sections aimed to be representative of different types of heterogeneities which generally occur in carbonate reservoir units (e.g. petrographic, diagenetic, and tectonic related). Samples were immersed in a 4.5 m<sup>3</sup> water tank, and then automated ultrasonic measurements were carried out using 250 kHz immersion transducers. This study was voluntarily based on high density ultrasonic sampling to denote progressive and abrupt variations in the acoustic response of the tested samples. This method successfully allowed detecting heterogeneities in the sample's reservoir properties, such as distinguishing decimeter-scale diagenetic horizons in samples assumed to be homogeneous. It also highlighted the impact of differential diagenesis between shells filling and the packing matrix, footprint of smaller interfaces such as cracks, stylolites and stratigraphic boundary.

## 6.6 Transport dans les roches très peu perméables : quels outils expérimentaux, quelles modélisations ?

(Transport phenomena in very low permeability rocks. Experimental and modeling needs)

### Responsables :

- Laurent Michot (LIEBE, U. Lorraine)  
laurent.michot@univ-lorraine.fr
- Virginie Marry (PECSA, Paris)  
virginie.marry@upmc.fr
- Gilles Pijaudier-Cabot (LFC-R, Pau)  
gilles.pijaudier-cabot@univ-pau.fr

### Résumé :

Les formations rocheuses très peu perméables sont importantes dans le cadre de la gestion des sites de stockage des déchets radioactifs en formations profondes et sont présentes dans les gisements non conventionnels d'hydrocarbures. L'étude du transport au sein de telles formations (et par extension à leurs équivalents manufacturés tels que les ciments) posent des problèmes spécifiques en termes de mesures de perméabilité, de caractérisation des espaces poreux et de préparation d'échantillons. De nouvelles techniques (tomographie, FIB, microspectroscopie) tendent à se développer pour l'étude de tels systèmes. Par ailleurs, pour de tels environnements, les techniques de modélisation multi-échelles sont particulièrement pertinentes, en termes d'interprétation des phénomènes physico-chimiques et pour pouvoir prédire le transport à long terme dans ces formations. L'objectif de cette session serait donc de faire un point sur les avancées récentes, tant expérimentales que de modélisation, et de pouvoir proposer plusieurs stratégies envisageables pour attaquer de façon optimale les problèmes de transferts d'échelles.

### 6.6.1 *Keynote communication* : **Transport moléculaire dans les nanopores des phases kérogènes : Darcy or not Darcy ?**

Roland Pellenq<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Department of civil and environmental engineering, MIT, Boston (Etats-Unis)*

Oil and natural gas from deep shale formations are expected to greatly impact the entire world economy as these are spread out everywhere around the globe. The abundance of shale gas resources worldwide - and the fact that burning natural gas emits less CO<sub>2</sub> than other fossil fuels - has created the expectation of a golden age of natural gas in a global energy system. This revolution relies on the large-scale deployment of new technologies allowing the production of hydrocarbons (oil, and especially natural gas), from source rock formations that were considered unproductive until very recently. The modeling of the hydrocarbons flow in nanoporous rocks such as shale has become an important new area of fluid mechanics. Gas/oil shale are sedimentary rocks with ultralow permeability. Estimates of long-term production and technically recoverable resources are, however, highly uncertain. The fundamental mechanisms controlling shale gas extraction remain poorly understood, and the classic theories and simulation techniques used by the oil and gas industry have proven inadequate for shale source rocks. Flow through shale poses a distinctive challenge that is new to the oil and gas industry : a large part of pores in shale have typical widths in the order of a few angstroms, and are within an organic porous material (kerogen) containing adsorbed hydrocarbons. At these scales, the pore size is on the order of the mean free path of the hydrocarbon molecules, and the Navier-Stokes equations with no-slip boundary condition cannot adequately represent the flow.

In the present talk, a generic model describing the flow in a multi-scale porous medium (such as shale) and fully taking into account the thermodynamics of confined fluids in nano and sub-nanopores, (including adsorption processes) is proposed without postulating any transport or diffusion mechanism. The model assumes that the rock pore void consist of different types of domains with different of pore sizes starting at the sub-nanometer level with a realistic atomistic description of the kerogen porosity (close to that of common porous carbons). This is a key improvement compared to current attempts to model flow (and production) in shale which all assume in the first place that the flow has to comply to Darcy's behavior.

### 6.6.2 (o) **Molecular Simulation of the Microporous Organic Matter in Shales**

Julien Collet<sup>1</sup>, Guillaume Galliero<sup>1</sup>, Yann Bigno<sup>2</sup>, Magali Pujol<sup>1</sup>, François Montel<sup>2</sup>, Philippe Ungerer<sup>2</sup>, Marianna Yiannourakou<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*LFC-R, Pau*

<sup>1</sup>*TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau*

<sup>1</sup>*Materials Design SARL*

Organic rich shales have been of growing interests over the last years to offset the decrease of conventional natural gas production [1]. A small fraction of such shales, the « solid » organic matter (called kerogen), plays a crucial role for the oil and gas content as being both source rock and low permeability reservoir.

Because of the nature of kerogen (complex micro-porous soft material), experiments are quite challenging and some of its physical properties are difficult to assess both from the static and the dynamic point of views.

The aim of our work is to study, using Molecular Simulations, the physical properties of kerogen to address these issues. Using direct characterization data from the literature [2], we create molecular models of

kerogen. Including other hydrocarbon compounds, we generate molecular structures mimicking the total organic matter under reservoir conditions. Then, molecular simulations are employed to quantify both static (adsorption ...) and transport (diffusion ...) properties.

This approach is complementary to experiments to provide major insights in the description of the organic matter of Shales. First, it gives an alternative to estimate physical properties of the organic matter under quasi-experimental conditions. Second, it can be used to assess the modeling of the transport properties at the nanometer scale in such systems.

References

[1] International Energy Agency. World Energy Outlook ; 2011 ; Vol. 23, p. 329.

[2] Kelemen et al. Direct Characterization of Kerogen by X-ray and Solid-State <sup>13</sup>C Nuclear Magnetic Resonance Methods. Energy & Fuels 2007, 21, 1548-1561.

### 6.6.3 (o) **Ion adsorption and diffusion in smectite clay barriers : molecular, pore, and continuum scale views**

Ian Bourg<sup>1</sup>, Ruth Tinnacher<sup>1</sup>, Michael Holmboe<sup>2</sup>, Christophe Tournassat<sup>3</sup>, James Davis<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Lawrence Berkeley National Laboratory, États-Unis*

<sup>2</sup>*Umea University, Suède*

<sup>3</sup>*BRGM, Orléans*

Compacted Na-bentonite (i.e., Na-smectite-rich) clay barriers are widely used in the isolation of landfills and contaminated sites and are considered for use in the geologic storage of high-level radioactive waste. At the conditions that occur in these barriers, a significant fraction of the pore space is located in clay interlayer nanopores with pore widths < 1 nm (the so-called two- and three-layer hydrates). The remainder of the pore space is located in poorly-characterized mesopores. To date, atomistic-level examinations of the pore space of compacted Na-bentonite have focused almost exclusively on the interlayer nanopores despite the potentially strong influence of mesopores on water flow, anion and salt diffusion, aqueous geochemistry, and chemo-mechanical coupling in compacted Na-bentonite. In this talk, we present a new set of experiments and simulations (macroscopic scale diffusion experiments, pore scale model calculations, molecular dynamics simulations) that examine the diffusion of cations, anions, and uncharged species in Na-smectite mesopores. Results obtained at different scales are broadly consistent with each other and provide insight into the aqueous geochemistry and transport properties of Na-bentonite barriers.

### 6.6.4 (o) **Champ de forces polarisable pour l'étude du transport dans les argiles à l'échelle moléculaire**

Stephane Tesson<sup>1</sup>, Mathieu Salanne<sup>1</sup>, Sami Tazi<sup>1</sup>, Benjamin Rotenberg<sup>1</sup>, Virginie Marry<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*PHENIX, Paris*

Les argiles ont de nombreuses applications industrielles, notamment dans le domaine de l'énergie et de l'environnement, pour lesquelles l'étude de l'interaction entre l'eau contenue dans les sols et les matériaux argileux est primordiale. Les argiles sont composées de feuillets d'aluminosilicate dont la charge négative est compensée par des contre-ions situés entre les feuillets. La valeur et la localisation de la charge, ainsi que la nature du cation compensateur qui va plus ou moins bien s'hydrater, jouent un rôle majeur sur les propriétés du fluide et en particulier sur ses propriétés de transport.

La valeur de la charge négative portée par les feuillets provoque des comportements différents en fonction de l'argile vis-à-vis de l'eau. Une argile neutre sera plutôt hydrophobe alors qu'une chargée sera plutôt hydrophile. Ce caractère hydrophile est dû en partie à l'hydratation des contre-ions situés entre les feuillets, qui provoque le gonflement des nanopores de l'argile.

A l'heure actuelle, les simulations moléculaires classiques tout atome permettent une description atomique de la structure, de la thermodynamique et de la dynamique du fluide à l'interface. Elles ont permis d'expliquer le caractère hydrophobe/hydrophile de différentes argiles [1,2]. Malheureusement, les résultats numériques ne permettent pas toujours de reproduire quantitativement les résultats expérimentaux, en particulier la dynamique des espèces mobiles, provoquant un doute sur la véracité des résultats et la validité des interprétations déduites des simulations [3]. Pour l'étude des argiles, aucun champ de forces classique ne tient compte de la polarisabilité des molécules, alors qu'elle joue un rôle non négligeable du fait de la présence d'un champ électrique à la surface [4]. C'est pourquoi le laboratoire PHENIX développe un champ de forces polarisable issu de calculs DFT pour étudier les systèmes argile/eau. Ce champ de forces est utilisé pour la première fois pour d'étudier la diffusion des cations et de l'eau au sein d'une montmorillonite sodique. Les résultats sont comparés avec ceux obtenus avec le champ de forces général CLAYFF et avec ceux obtenus expérimentalement.

- [1] Rotenberg, B. et al., J. Am. Chem. Soc., 2011, 133, 20521  
 [2] Botan, A. et al., J. Phys. Chem. C., 2013, 117, 978-985  
 [3] Marry, V. et al., J. Phys. Chem. C., 2013, 117, 15106-15115  
 [4] Kamath, G. et al., J. Phys. : Condens. Matter, 2013, 25, 305003

### 6.6.5 (o) Multi-scale modeling of charged porous media for separation chemistry

Jean-François Dufrêche<sup>1</sup>, Bertrand Siboulet<sup>1</sup>, Pierre Turq<sup>2</sup>, Benoit Coasne<sup>3</sup>, Grégoire Allaire<sup>4</sup>, Robert Brizzi<sup>4</sup>, Andro Mikelic<sup>5</sup>, Olivier Bernard<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ICSM, Bagnols sur Ceze

<sup>2</sup>PHENIX, Paris

<sup>3</sup>Institut Charles Gerhardt, Montpellier

<sup>4</sup>CMAP, Palaiseau

<sup>5</sup>ICJ, Villeurbanne

Porous charges media such as silica glasses or geological media are commonly used in the context of separation chemistry for dynamical separation methods. In that case, a solution for which some solute particles have to be removed goes through the media and selective complexation groups the surface of the solid phase allow the separation. This method is especially important for decontamination and confinement of heavy metals in geological clays, such as radioactive elements and fission products in the context of nuclear energy. We used molecular modelling and multi-scale approaches in order to understand the properties of such systems and especially the dynamics of ions and molecules at the vicinity of charged silica and alumino-silica surfaces.

The interactions and the dynamical processes strongly depend on the density of charged groups at the surface. We show that Bjerrum electrostatic pairs are formed between the negatively charged oxygens of the silica and the cations of the solution. This phenomenon drives the electrostatic and transport properties in the system. Association constants depend of the nature of the ions and exhibit different values and Hofmeister series compared to the bulk results. An important part of the selectivity can be related to the size of the particles and this effect can be properly taken into account by a MSA (Mean Spherical Approximation) model. Finally, a homogenisation procedure has been applied to calculate the various transport properties (electro-osmosis, Darcy's

law, ion diffusion, etc.) of the system. The model we homogenised is not ideal and is able to reproduce the various transport properties up to molar concentrations. We show that the departure from ideality can be important for concentrated systems and they can quantitatively change the transport properties by typically a factor of two at molar concentrations.

### 6.6.6 Keynote communication : Structure et transport dans les géomatériaux poreux : Apport des graphes topologiques de l'espace poreux

Pierre Levitz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PHENIX, Paris

Les progrès actuels de la micro et nano tomographie de rayon X permettent et permettront de visualiser des matériaux poreux multiéchelles avec des résolutions spatiales allant jusqu'à quelques 10 nm. C'est particulièrement le cas des géomatériaux naturels ou industriels comme les roches pétrolières [1], les shales ou le ciment [2,3]. Ces progrès rapides génèrent des reconstructions 3D complexes. Cela pose le problème du choix des outils d'analyse morphologiques permettant de simplifier et de focaliser l'étude en capturant les informations nécessaires. Dans cet exposé, nous discutons de quelques propriétés de graphes topologiques de l'espace poreux. En premier lieu, nous montrerons leur intérêt simplificateur pour décrire les propriétés de connexion, notamment pour les poreux en évolution près d'un seuil de percolation où la perméabilité s'annule [4]. En second lieu, nous discuterons de leur utilisation dans une définition géométrique du « pore élémentaire » au sein d'une structure complexe, autorisant une segmentation de l'espace poral. Enfin, nous montrerons comment l'utilisation des graphes topologiques contribue à l'étude du transport (moléculaire et/ou colloïdal) au sein de milieux poreux en découplant les échelles locales (adsorption, dynamique intermittente [5] et confinement au sein des pores élémentaires) des échelles à longue distance, sensibles à la connexion du réseau poreux.

- [1] Han M, Youssef S, Rosenberg E, Fleury M and Levitz P, Phys. Rev E, 79 031127 (2009)  
 [2] Brisard, S; Chae, RS; Bihannic, I; Michot, L; Guttman, P; Thieme, J; Schneider, G; Monteiro, PJM; Levitz, P. American Mineralogy Vol : 97 Pages : 480-483 (2012).  
 [3] Marie D. Jackson, Juhyuk Moon, Emanuele Gotti, Rae Taylor, Sejung R. Chae, Martin Kunz, Abdul-Hamid Emwas, Cagla Meral, Peter Guttman, Pierre Levitz, Hans-Rudolf Wenk and P. Monteiro, J. Am. Ceram. Soc., 1-9 (2013)  
 [4] Levitz, P; Tariel, V; Stampanoni; Gallucci, E, EPJ-AP Vol 60, 24202 (2012)  
 [5] P. Levitz, P. A. Bonnaud, P.-A. Cazade, R. J.-M. Pellenq and B. Coasne, Soft Matter, 9, 8654-8663 (2013)

### 6.6.7 (o) Dynamique d'un réseau de fractures drainant un solide élastique avec production interne de fluide

François Renard<sup>1</sup>, Maya Kobchenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

Plusieurs systèmes naturels impliquent des couplages entre production interne de fluides et expulsion de ces derniers au travers de roches imperméables : déshydratation dans les zones de subduction, migration primaire d'hydrocarbures ou fusion partielle lors de la mise en place de basaltes. Dans tous ces systèmes, le fluide est produit à l'intérieur du volume et percole à travers la roche en créant son propre chemin de fractures. Le processus de couplage entre la production interne d'un fluide

dans une roche élastique et le réseau de fracture produit pour expulser ce fluide reste à caractériser. Nous proposons ici deux expériences de laboratoire complémentaires pour comprendre ce processus.

Dans un premier temps, des échantillons de shale de Green River, contenant 10% de matière organique immature, ont été chauffés à 300°C et imagés en 3D par tomographie aux rayons-X. Le chauffage induit une maturation de la matière organique qui se transforme en gaz et huile, produisant localement des surpressions fluides. Les fluides sont expulsés par la création d'un réseau de fractures connectées en 3D. La fissuration est contrôlée par la distribution initiale de la matière organique et par l'état de contrainte appliqué à la roche.

Dans un second temps, une expérience analogue a été construite dans laquelle une plaque de gel élastique contenant de l'eau, du sucre et des levures est laissée pendant plusieurs heures à une température de 25°C. Le gaz carbonique produit par les levures se concentre localement dans le solide élastique, produisant des surpressions fluides, à l'origine de la création d'un réseau de fracture percolant. Une fois les fractures formées, elles poursuivent leur propre dynamique d'ouverture et de fermeture, permettant l'expulsion du gaz produit. Dans ce système analogue, la dynamique du réseau de fracture est suivie au cours du temps avec une caméra. Les résultats sont les suivants : 1) le réseau de fracture possède une topologie de drainage avec des propriétés intermédiaires entre celles d'un réseau de rivière et celles d'un réseau de fracture produit par fragmentation hiérarchique du solide ; 2) le réseau de fracture montre une dynamique temporelle avec deux temps caractéristiques, l'un correspond aux pulsations de chacune des fractures, l'autre à la dynamique collective du réseau.

### 6.6.8 (o) Direct estimation from pore size distribution of intrinsic and apparent permeabilities in tight porous media

David Grégoire<sup>1</sup>, Fadi Khaddour<sup>1</sup>, Gilles Pijaudier-Cabot<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Anglet

The purpose of this work is to achieve a better understanding of the relationship between damage, failure and the transport properties of tight porous materials. This is typically of utmost importance in the enhancement of non-conventional reservoirs or in the long-term assessment of the tightness of CO<sub>2</sub> geological storage, vessels or containment facilities.

Many authors have looked for predictive models of porous media permeability. Pioneering work by Kozeny related the permeability to the porosity, the tortuosity and an average pore size. Usually, analyses are restricted to intrinsic permeability of the material and the evolution of the apparent permeability, with respect to the pressure gradient and to the nature of the fluid considered are left aside. This paper aims at presenting a new model capable to provide estimates of the apparent permeability directly from the PSD measurements and from the properties of the fluid to be considered. The intrinsic permeability and the evolution of the apparent permeability with mean pressure are provided by combining Darcy, Poiseuille and Knudsen laws, which represent respectively the macroscale flow, the microscale viscous flow and the microscale diffusion flow in the porous media. In order to achieve a porous network in the material, which is consistent with a mercury intrusion technique, random generation of pores is implemented. The technique yields a hierarchical porous network, which mimics the porous space measured experimentally.

Comparisons with experimental data acquired on mortar specimens show that the model is able to reproduce both the intrinsic and the apparent permeabilities and their evolution when the material is subjected to mechanical damage, provided the PSD are available. Test data with several types of gases compare quite well with the model.

Keywords : Damage, transport properties, permeability, pore size distribution, porous media.

Acknowledgment : Financial supports from the European Research Council (grant Failflow - 27769), from the French Région Aquitaine (grant CEPAGE - 20121105002) and from the French Agglomération Côte Basque - Adour are gratefully acknowledged.

### 6.6.9 (o) Electrokinetics, reverse osmosis, and diffusion in a compacted unsaturated bentonite

Andre Revil<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Colorado School of Mines, Golden, États-Unis

We developed a model of cross-coupled flow in partially saturated porous media based on electrokinetic coupling including the effect of ion filtration and the multi-component nature of the pore water (wetting) phase. We start with the local Nernst-Planck and Stokes equations and we use a volume-averaging procedure to obtain the generalized Ohm, Fick, and Darcy equations with cross-coupling terms at the scale of a representative elementary volume of the porous rock. Rather than writing the electrokinetic terms in terms of zeta potential (the electrical double layer potential on the slipping plane located in the pore water), we developed our theory in terms of an effective charge density dragged by the flow of the pore water. This charge density is controlled by the permeability at full saturation. We also developed an electrical conductivity equation including the effect of saturation on both bulk and surface conductivities. This model is compared with various data including electrical conductivity data, streaming potential coupling coefficient data and electroosmotic permeability measurements at different water saturations. Relative permeability and capillary pressure are described with the Brooks and Corey or van Genuchten models, both offering a simple way to account for saturation but neglecting hysteretic effects. The model appears to predict correctly the influence of salinity (including at high salinities), porosity, type of cation, and saturation on the osmotic coefficient and the dependence of the diffusion coefficient of the salt with the salinity. The good agreement between the model predictions and the experimental data suggests that this model may be useful for detecting and imaging unsaturated flow from passive electromagnetic signals, the migration of contaminants or water due to electrical fields within the vadose zone, the dewatering of partially-saturated soils, or the osmotic efficiency and transport properties of clay membranes.

### 6.6.10 (o) Modèle à trois échelles pour le transport ionique dans une argile gonflante incluant les effets de corrélation ion-ion

Christian Moyne<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LEMMA, Nancy

Pour étudier le mouvement d'espèces ioniques dans une argile gonflante caractérisée par trois échelles distinctes de longueur (nano, micro et macro) et deux niveaux de porosité (nano et micropores), un nouveau modèle est proposé. À la plus petite échelle (nanoscopique), le milieu est décrit comme des feuillets d'argile parallèles électriquement chargés saturés par une solution aqueuse contenant des ions mono et bivalents formant une double couche électrique. La pression de disjonction calculée par une approche de mécanique statistique, à la différence des modèles de type Poisson-Boltzmann, est capable de prédire des forces d'attraction entre les particules pour des ions polyvalents en raison des effets de corrélation ion-ion. À l'échelle intermédiaire (microscopique), le système est composé de particules argileuses et d'un électrolyte (bulk)

où la pression de disjonction à l'échelle nanométrique est incorporée dans une forme modifiée du principe de Terzaghi. A l'échelle macroscopique, les couplages électro-chimio-mécaniques dans les particules d'argile sont homogénéisés avec le transport des ions dans le bulk occupant les micropores. L'image macroscopique résultante est un transport des ions dans le bulk fortement couplé avec la mécanique des particules qui jouent un rôle de sources/puits de masse dû à l'adsorption/désorption dans la double couche à l'échelle nanométrique. La version quasi-équilibre du modèle avec le fluide des nanopores en équilibre thermodynamique instantané avec le bulk, permet de construire numériquement les isothermes d'adsorption ainsi que la loi constitutive du coefficient de retard régissant l'adsorption des ions mono et divalents au sein des particules. La loi constitutive pour la pression de gonflement macroscopique montre des régions d'attraction pour certaines gammes de concentration des ions bivalents. Ce modèle est appliqué pour simuler la diffusion des ions dans un revêtement d'argile compacté dans une décharge contrôlée. En raison du comportement distinct de la pression de gonflement pour chaque espèce ionique, des régimes d'évolution différents sont observés pour la diffusion du calcium ou du sodium à travers la couche d'argile.

### 6.6.11 (o) Pore network model of electrokinetic transport through charged porous media

Amaël Obliger<sup>1,2</sup>, Marie Jardat<sup>1</sup>, D. Coelho<sup>2</sup>, S. Bekri<sup>3</sup>, B. Rotenberg<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PHENIX, Paris

<sup>2</sup>ANDRA, Châtenay-Malabry

<sup>3</sup>IFP EN, Rueil-Malmaison

We introduce a method for the numerical determination of the steady-state response of complex charged porous media to pressure, salt concentration and electric potential gradients. The macroscopic fluxes of solvent, salt and charge are computed within the framework of a Pore Network Model (PNM) [1], which describes the pore structure of the samples as networks of pores connected to each other by channels. The PNM approach is used to capture the couplings between solvent and ionic flows which arise from the charge of the solid surfaces. The microscopic transport coefficients on the channel scale, taken here of a simple analytical form obtained previously by solving the Poisson-Nernst-Planck and Stokes equations in a cylindrical channel [2], are upscaled for a given network by imposing conservation laws for each pores, when macroscopic gradients are applied to the sample. The complex pore structure of the material is captured by the distribution of channel diameters. We investigate the combined effects of this complex geometry, the surface charge and the salt concentration on the macroscopic transport coefficients. The upscaled numerical model preserves the Onsager relations between the latter, as expected [3]. The calculated macroscopic coefficients behave qualitatively like their microscopic counterparts, except for the permeability and the electro-osmotic coupling coefficient when the electrokinetic effects are strong. Quantitatively, the electrokinetic couplings increase the difference between the macroscopic coefficients and the microscopic ones for a single channel of average diameter.

References

1. S. Bekri, C. Laroche, O. Vizika. International Symposium of the Society of Core Analysts, 2005.
2. A. Obliger, M. Duvaill, M. Jardat, D. Coelho, S. Bekri, and B. Rotenberg, Physical Review E 88, 013019 2013.
3. E. Brunet and A. Ajdari, Physical Review E 69, 016306 2004.

### 6.6.12 (p) Fluids transport in nanopores : from local properties to shear induced swelling

Guillaume Galliero<sup>1</sup>, Hai Hoang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau

Numerous natural materials, such as clays or shale, are largely composed of nanopores. However, in such low permeability systems, the flow properties of fluids are difficult to both measure and model. These difficulties come from different origins. One may cite, among others :  
 -apparent permeability defined in the Darcean frame is fluid and state dependent (e.g. Klinkenberg effect in gases, slip length in liquids ...)  
 -highly confined fluids are strongly inhomogeneous (e.g. selective adsorption, molecular packing ...)  
 -a strong coupling may exist between the fluid properties and the solid matrix (e.g. swelling ...)

Thus, to improve our understanding at the pore scale, we have used out of equilibrium molecular simulations of simple fluids confined in slit nano-pore. Based on these well controlled microscopic numerical « experiments » we will show that it is possible to address some of the issues mentioned previously in idealized situations [1-4]. In particular, we will point out the link between density inhomogeneities and local transport properties (diffusion [1] and viscosity [2-3]). In addition, we will discuss about the coupling that may occur between shear and swelling in such highly confined systems [4].

References

- [1] H. Hoang, G. Galliero, Grand canonical-like molecular dynamics simulations : Applications to anisotropic mass diffusion in a nanoporous medium, J. Chem. Phys. 136, 184702, 2012.
- [2] H. Hoang, G. Galliero, Local viscosity of a fluid confined in narrow pore, Phys. Rev. E 86, 021202, 2012.
- [3] H. Hoang, G. Galliero, Local shear viscosity of strongly inhomogeneous dense fluids : from the hard sphere to the Lennard-Jones fluids, J. Phys : Cond. Matter 25, 485001, 2013.
- [4] H. Hoang, G. Galliero, Swelling/Shrinkage Induced by Shear in Narrow Pores. Poromechanics V : pp. 685-692, 2013

### 6.6.13 (p) Hydrodynamique et phénomènes électrocinétiques dans les argiles : ce que nous apprennent les simulations moléculaires sur la validité des théories analytiques

Virginie Marry<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PHENIX, Paris

Les argiles constituent un matériau lamellaire contenant une large variété de tailles de pores. C'est pourquoi la compréhension des phénomènes de transport des fluides dans ces matériaux est un défi et requiert une approche multi-échelle. Les simulations de dynamique moléculaire permettent d'appréhender la dynamique des espèces mobiles à l'échelle du nanopore et montrent que la diffusion des molécules dépend de nombreux facteurs comme le type d'argile, la nature des contre-ions ou la présence d'autres molécules. Leur utilisation est cependant limitée à des systèmes de petites tailles ne dépassant pas la centaine d'Angstroms. A l'échelle macroscopique, le transport est habituellement décrit par une loi de Darcy, tenant compte des phénomènes de convection dans les pores les plus gros et de la géométrie complexe du poreux. Pour des pores de tailles intermédiaires, la dynamique moléculaire a montré que l'équation de Stokes étaient vérifiées, aussi bien pour les phénomènes hydrodynamiques qu'électrocinétiques, mais que les flux convectifs étaient sensibles au type de surface considérée, induisant des conditions aux limites de la vitesse du fluide à la surface différentes. Ainsi l'eau glissera plus à la surface d'une argile neutre plutôt hydrophobe, qu'à celle d'une argile chargée. D'autre part, nous avons montré que l'équation de Poisson-Boltzmann qui permet usuellement d'obtenir des profils ioniques pour le calcul des phénomènes électrocinétiques, ne permet pas seule de rendre compte des profils de vitesse obtenus par dynamique moléculaire et que l'évaluation des profils ioniques requiert une description plus raffinée.

### 6.6.14 (p) Nouvelle technique expérimentale pour la mesure simultanée de l'adsorption et du gonflement induit en milieu microporeux et modélisation poromécanique associée

Laurent Perrier<sup>1</sup>, Frédéric Plantier<sup>1</sup>, Gilles Pijaudier-Cabot<sup>1</sup>, David Grégoire<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Anglet

Le but de ce travail est de prédire le couplage entre l'adsorption de gaz et la déformation d'un milieu microporeux (taille de pores inférieure à 2nm). Dans les réservoirs non conventionnels de type Coal Bed Methane, ce gonflement de la matrice microporeuse, induit par adsorption, est la cause de la perte de production lors de l'injection de CO<sub>2</sub>. En effet, il provoque la refermeture de la macroporosité naturelle de transport, diminuant ainsi la perméabilité globale de la roche.

Expérimentalement, différents auteurs ont mesuré des isothermes d'adsorption et les déformations induites, notamment sur des charbons d'intérêt pétrolier. Cependant, la plupart des résultats présentent des mesures découplées non réalisées simultanément, voir effectuées sur des échantillons différents. Quelques travaux présentent des mesures d'adsorption et de gonflement in-situ simultanée mais la déformation volumétrique est extrapolée à partir de mesures globales de l'expansion de la silhouette de l'échantillon. Dans ce papier est développé une nouvelle expérience où les isothermes d'adsorption et les gonflements induits sont mesurés simultanément. Les quantités d'excès adsorbées sont mesurées par technique manométrique. La déformation induite est mesurée par corrélation d'images numériques. Ainsi, le champ complet de déformation à la surface de l'échantillon est accessible.

Théoriquement, un nouveau modèle poromécanique est présenté afin de prédire la déformation volumique du matériau à partir de la mesure de l'isotherme d'adsorption. Un schéma incrémental est proposé où les propriétés poromécaniques sont recalculées à chaque incrément de pression en fonction des variations de porosité induites par le gonflement de la matrice.

Remerciements : Les supports financiers de la région d'Aquitaine (projet CEPAGE/20121105002), de l'Institut Carnot ISIFoR ainsi que de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (BQR) sont vivement remerciés.

### 6.6.15 (p) Changes in volume and size distribution of voids in low porosity granite due to fracturing, alteration and mineralisation : application of an advanced routine to conventional mercury porosimetry

Martin Stanek<sup>1</sup>, Yves Geraud<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Czech Academy of Sciences, Prague, République tchèque

<sup>2</sup>GeoResources, Nancy

Connected porosity volume, throat diameter (TD) and trapping capacity of fine-grained Lipnice granite from the Melechov Massif, Czech Republic, were measured by laboratory mercury injection tests in order to quantify the porosimetric changes related to fracturing, fracture halo alteration and fracture surface mineralisation. A comparative suite of 40 specimens from a 150 m drill core was analysed and included pristine granite, fractured fresh granite, fractured altered granite with hematite, with chlorite and hematite, with smectite and hematite and weathered granite. Within the alteration facies, specimens with different intensity of fracturing and with various proportions of different fracture surface

mineralisations were analysed in order to discriminate the related effects. Also specimens with and without macroscopically open cracks were analysed to discriminate the volumes relative to the open cracks and to the rock matrix. Porosities range from 0.3 % for pristine granite to 3.8 % for pervasively chlorite-altered granite with no macroscopic voids and up to 6.5 % for macroscopically fractured and porous weathered granite. The pristine granite void space TD ranges from 0.05 to 0.4  $\mu\text{m}$ . Fracturing is manifested by higher incremental volumes within the pristine granite TD range and by additional volume accessible by TDs up to 0.8  $\mu\text{m}$  together yielding bulk porosities up to 1.0 % for the fractured fresh granite. The hematite and smectite-hematite alterations feature reduction of the TD and formation of voids smaller than in the pristine or the fractured fresh granite. The chlorite alteration features broadening of the TD interval in the submicron range including both larger and smaller throats as compared to the pristine facies. The weathered granite features the broadest TD interval with globally the highest incremental volumes for TD above 1 micron and with substantial porosity with TDs on the order of tens of microns in case of its intensively fractured variety.

## 6.7 Comportements hydro-mécaniques et chimiques des géo-barrières des échelles microscopiques à macroscopiques

### (HMC properties of geological barriers from microscopic to macroscopic scales)

#### Responsables :

- Stéphane Gaboreau (BRGM)  
s.gaboreau@brgm.fr
- Jean-Charles Robinet (ANDRA)  
jean-charles.robinet@andra.fr

#### Résumé :

Différents géomatériaux naturels (roches argileuses) ou anthropiques (matériaux cimentaires, matériaux argileux ouvragés, ...) sont utilisés comme barrières de confinement dans des ouvrages industriels (stockage de déchets ménagers ou radioactifs, stockage de CO<sub>2</sub>) pour leurs faibles propriétés de transfert mais aussi pour leur durabilité et résistance mécanique. Ces matériaux constituent généralement des milieux poreux finement divisés, caractérisés par des pores de dimensions nanométriques, une organisation microstructurale complexe et de fortes interactions avec les espèces chimiques en solution leur conférant des propriétés hydro-mécaniques et chimiques (HMC) favorables. Au cours de la vie des ouvrages, ces géomatériaux pourront subir des sollicitations diverses (hydriques, mécaniques et/ou chimiques), susceptibles de faire évoluer leur organisation microstructurale et leurs propriétés HMC à petites échelles impliquant de fait des modifications de leurs propriétés macroscopiques intrinsèques.

Cette session s'intéresse aux processus d'évolution HMC des géomatériaux sous différents contextes de sollicitations en particulier dans un contexte d'interfaces entre matériaux ; aux moyens de caractériser expérimentalement ces évolutions aux différentes échelles (microscopique à macroscopique) notamment à partir de méthodes d'imagerie scientifique ; et aux moyens de représenter ces évolutions par des outils numériques.

#### Mots clés :

Barrières naturelles et ouvragées, couplage HMC, changement d'échelle, microstructure

### 6.7.1 (o) Investigation of microstructures in naturally and experimentally deformed reference clays from underground research laboratories by using innovative methods in scanning electron microscopy

Guillaume Desbois<sup>1</sup>, Susanne Hemes<sup>1</sup>, Maartje Houben<sup>2</sup>, Ben Laurich<sup>1</sup>, Jop Klaver<sup>1</sup>, Nadine Höhne<sup>3</sup>, Janos Urai<sup>1</sup>, Gioacchino Viggiani<sup>4</sup>, Pierre Bésuelle<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Structural Geology, Tectonics and Geomechanics, Aachen, Allemagne

<sup>2</sup>Utrecht University, Faculty of Geosciences, Utrecht, Pays-Bas

<sup>3</sup>Institut für Bauvorsuchung der RWTH, Aachen, Allemagne

<sup>4</sup>Laboratoire 3SR, Grenoble

Due to their low permeability and possible self-sealing properties in natural conditions, clays are of major importance for nuclear waste disposal in deep geological formations and for reservoir development in unconventional resources. In clays, porosity at grain boundaries is one of the fundamental parameters, defining the fluid transfer properties of the material. Unfortunately, most traditional methods fail to directly image both the porosity in a representative area (or volume) down to the resolution of pore scale and the nature of the pore filling fluid. The application of ion beam milling techniques to fine-grained clays allows investigating porosity with unprecedented clarity at nm-resolution within representative areas under SEM. SEM pore imaging on Broad Ion Beam (BIB) prepared surface gives both qualitative and quantitative insights of porosity in 2D cross-sections. The combination of cryogenic techniques with ion beam milling preparation allow studying pore fluids in preserved clay-rich samples. The characterization of pore network in volume was done by using Focussed Ion Beam coupled with SEM (FIB-SEM) in order to image 3D pore network and try to find complementarities with 2D porosity analysis (BIB-SEM) and correlation with bulk porosity measurement (e.g. mercury injection porosimetry (MIP)). Effective pore connectivity is currently investigated with an analogue of MIP based on Wood's metal, which is solid at room temperature and allows microstructural investigation of Wood' metal filled pores with BIB-SEM after the injection.

More recently, we are developing the combination of conventional stress-strain data (bi-axial and triaxial deformation tests), strain localization characterized by strain fields measurement (DIC - Digital Image Correlation) and microstructural investigations below micrometre scales (BIB-SEM) on a same sample, which offers the unique opportunity to answer to the fundamental questions : (1) « When », (2) « Where » and (3) « How » the sample were deformed in laboratory.

### 6.7.2 (o) Compréhension des propriétés mécaniques macroscopiques des matériaux argileux gonflants compactés par l'étude multi-échelles de la microstructure

Luc Massat<sup>1,2</sup>, Olivier Cuisinier<sup>1</sup>, Isabelle Bihannic<sup>3</sup>, Claret Francis<sup>2</sup>, Farimah Masrouri<sup>1</sup>, Manuel Pelletier<sup>3</sup>, Stéphane Gaboreau<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LEMMA, Nancy

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

<sup>3</sup>LIEC, Nancy

Dans les concepts multi-barrières proposés par les agences en charge de l'étude de la faisabilité de stockages de déchets radioactifs en formation géologiques profondes, des matériaux argileux de type bentonite sont susceptibles d'être utilisés. Ces matériaux argileux peuvent être mis en contact avec des fluides (solutions avec une chimie contrastée en terme

de pH, Eh, force ionique, etc...) issus des matériaux du stockage (ciment par exemple). Par conséquent, les caractéristiques hydriques et mécaniques de ces matériaux argileux pourraient évoluer au cours du temps. Ainsi, la compréhension de ces couplages (évolution chimique vs propriétés mécaniques) est donc indispensable afin d'évaluer les caractéristiques hydromécaniques des matériaux argileux dans le temps. L'étude proposée couple l'évolution des propriétés mécaniques macroscopiques (pression de gonflement) avec la microstructure d'une smectite monophasique (Kunipia G) au cours de l'hydratation.

Dans ce but, un travail de conception d'une cellule œdométrique a été réalisé assurant un suivi dynamique des pressions de gonflement et de la microstructure de la smectite par  $\tau$ -tomographie X. La cellule développée permet de ne pas perturber le système et de réaliser plusieurs acquisitions à différentes étapes du processus de gonflement. Ainsi, pour bénéficier de l'apport de la  $\tau$ -tomographie, la taille de l'échantillon a été réduite et le design de la cellule adapté afin d'augmenter au maximum la résolution des images et d'identifier des pores avec une résolution par pixel proche de quelques  $\mu\text{m}$  (macroporosité). Les premiers essais de gonflement réalisés à ce jour avec les cellules développées sont cohérents avec ceux effectués parallèlement dans des cellules œdométriques conventionnelles de plus grandes dimensions. De plus, la quantification de la porosité au cours du processus d'hydratation indique un remplissage progressif de la macroporosité en corrélation avec l'évolution de la pression de gonflement au cours du temps. Par la suite, une analyse des échantillons *in post-mortem* vise à observer la microstructure de l'échantillon à l'échelle du feuillet et à étudier l'influence de différents solutés (NaCl, CaCl<sub>2</sub>, KCl) à différentes concentrations (10<sup>-4</sup> M, 10<sup>-1</sup> M).

### 6.7.3 (o) Observation au MEB Environnemental des Gonflements de Films Fins d'Argile Induits par des Variations d'Humidité Relative

Benoît Carrier<sup>1</sup>, Linlin Wang<sup>2</sup>, Matthieu Vandamme<sup>3</sup>, Roland Pellenq<sup>3,4</sup>, Michel Bornert<sup>1</sup>, Alexandre Tanguy<sup>2</sup>, Henri Van Damme<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Navier, Champs sur Marne

<sup>2</sup>LMS, Palaiseau

<sup>3</sup>CiNaM, Marseille

<sup>4</sup>MIT, États-Unis

Les propriétés de gonflement des matériaux à base argileuse jouent un rôle prépondérant dans le comportement hydro-mécanique de la barrière géologique de confinement du site souterrain de stockage de déchets radioactifs prévu en France. Dans le cadre d'une approche bottom-up de la prédiction de ce comportement, nous présentons ici une série d'expériences de gonflement, effectuée sur des échantillons mésoscopiques originaux, imaginés dans le but de créer une passerelle expérimentale entre l'échelle du feuillet argileux et l'échelle de l'échantillon macroscopique.

Les échantillons mésoscopiques en question sont des films fins (d'environ 40  $\mu\text{m}$  d'épaisseur) d'argile de type montmorillonite, préparés par évaporation de suspension argileuse. Plusieurs échantillons d'argile ont été préparés : argile de référence Swy-2, la même argile homoionisée avec des ions sodium et avec des ions calcium, et une cloisite homoionisée avec des ions sodium.

Les extrémités des films ont été observées au MEB environnemental à diverses humidités relatives [1]. Les images obtenues ont été analysées par corrélation d'images numériques afin de mesurer les gonflements induits par les variations d'humidité. Par pesée dans un environnement à humidité contrôlée, nous avons également mesuré les isothermes à l'eau des films sur un cycle complet d'adsorption-désorption.

Les données obtenues à l'échelle des films ont été comparées avec des données à l'échelle du feuillet d'argile, obtenues par diffraction

rayon X et par simulation moléculaire : tant les données de gonflement que de quantité d'eau adsorbée présentent de fortes similitudes lorsque l'on compare les deux échelles. Ce résultat suggère que les films que nous avons fabriqués se comportent comme un empilement de feuillets argileux gonflant librement, sans contribution significative de la mésoporosité.

Références :

[1] B. Carrier, L. Wang, M. Vandamme, R. J.-M. Pellenq, M. Bornert, A. Tanguy, H. Van Damme, *Langmuir* 29, 12823 (2013).

#### 6.7.4 (o) Hydration sequence of swelling clays

Fabrice Salles<sup>1</sup>, Olivier Bildstein<sup>2</sup>, Bénédicte Prélot<sup>1</sup>, Jerzt Zajac<sup>1</sup>,  
 Henri Van Damme<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institut Charles Gerhardt, Montpellier*

<sup>2</sup>*CEA Cadarache, Saint Paul-lez-Durance*

<sup>3</sup>*Laboratoire de Physico-Chimie des Polymères et des Milieux  
 Dispersés, Paris*

Swelling clays present a multi-scale structure and therefore a multi-scale porosity : macroporosity / aggregates - inter-particle / mesoporosity - microporosity / interlayer spaces. In this work, XRD results, adsorption calorimetry for water and thermoporometry results are coupled to look at the evolution of pore size for mesoscopic pores and interlayer spaces. Thermoporometry is based on the phase transition of a fluid confined in a porous media and allows us to follow the pore size distribution ranging between 2 and 50 nm, by determining the transition temperature for confined liquids for completely saturated samples. The originality of our work consists in the study of unsaturated samples, equilibrated at different relative humidities (RH). The aim is to track the penetration of water inside each scale of porosity as a function of the RH. Thermoporometry experiments bring important information : the mesopores (with a mean radius from 2 nm) start to swell at 54% RH for homoionic Li- and Na-montmorillonites (Li- and Na-MX) [1,2]. The interlayer spacing is only filled with one or two layers of water at RH < 60%, and swelling starts only at RH > 80%.

At this stage, we can propose the following hydration sequence for saturated Li- and Na- MX : hydration of mesopores surfaces, hydration of interlayer spacing with one layer of water, complete saturation of mesopores, hydration of interlayer spacing with a second layer of water and osmotic swelling in mesopores [3]. At higher RH, osmotic swelling in interlayer spacing can occur. For others cations (K+, Cs+, Ca2+) placed in the interlayer spacing, the same behaviour for the mesoscopic porosity is observed, but at higher RH [2]. Further, the behavior of mixte Na-Ca montmorillonite (the natural MX-80) is investigated to elucidate the predominant cation imposing the mechanism of hydration and discuss the distribution of the cation in the interlayer space. Finally the diffusion mechanisms occurring in the interlayer space is also estimated.

[1] F. Salles, I. Beurroies, O. Bildstein, M. Jullien, J. Raynal, R. Denoyel, H. Van Damme, *Appl. Clay Sci.*, 39, 186, 2008.

[2] F. Salles, O. Bildstein, J.M. Douillard, M. Jullien, J. Raynal, H. Van Damme, *Langmuir*, 2010, 26, 5028

[3] F. Salles, J.M. Douillard, R. Denoyel, O. Bildstein, M. Jullien, I. Beurroies, H. Van Damme, *J. Colloid Interf. Sci.*, 2009, 333, 510

## 6.8 Géotechnique et densification du tissu urbain

### Responsables :

- Joëlle Riss (Bordeaux)  
joelle.riss@u-bordeaux1.fr
- Antoine Marache (Bordeaux)  
a.marache@cdga.u-bordeaux1.fr

### Résumé :

La géotechnique dans son sens le plus large peut regrouper la mécanique des sols, la mécanique des roches et la géologie de l'ingénieur. Ces trois domaines se nourrissent des connaissances élaborées par les géologues pour déjouer les pièges directs ou indirects tendus par l'environnement géologique aux acteurs de l'aménagement raisonné des infrastructures et des superstructures. Au-delà des grands travaux (lignes TGV, tunnel, barrages, infrastructure routière, stockage souterrain...) distribués en tout lieu du territoire, les travaux "géotechniques" en milieu urbain demandent plus que jamais, d'autant que la densification du tissu urbain est à l'ordre du jour, une concertation du « géotechnicien » et du géologue pour détecter les aléas et déjouer les pièges. Cette session est une invitation aux géologues, archéologues, géotechniciens s.l. (Cf. supra) à venir témoigner d'une part de la nécessaire prise en compte des ces aléas et des risques associés et, d'autre part, des contraintes qui en découlent dans l'élaboration de leurs projets. .

### Abstract :

Geotechnical engineering in its broadest sense can group soil mechanics, rock mechanics and engineering geology. These three areas are based on knowledge learned from geologists to thwart direct or indirect traps laid by the geological environment to infrastructure or superstructure planning actors. Beyond the great works (high-speed train lines, tunnels, dams, road infrastructure, underground storage...) located anywhere in the country, the "geotechnical" works in urban areas are more requesting than ever (especially as the urban densification is topical) of concertation between geotechnical engineers and geologists to detect and avoid hazards. This session is an invitation to the geologists, archaeologists, geotechnical engineers (see above) to present on the one hand the need to take account of these hazards and associated risks and, in another hand, the resulting constraints in the development of their projects.

### 6.8.1 (p) Geophysical-geotechnical analysis of karstic processes and 3D affected volumes in the Central Ebro Basin (Gallur, Zaragoza, Spain).

Oscar Pueyo Anchuela<sup>1</sup>, Antonio Casas-Sainz<sup>1</sup>, Pedro López Julián<sup>2</sup>, José ángel Pérez Benedicto<sup>2</sup>, Andrés Pocoví Juan<sup>1</sup>, Carlos Liesa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Zaragoza, Espagne

<sup>2</sup>Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia, Universidad de Zaragoza, Espagne

The Central Ebro Basin is the southern Pyrenean foreland basin ; endorheic sedimentation allowed precipitation of evaporites during Cenozoic times and solution of evaporites underlying the alluvial Quaternary sediments favors the present-day development of mantle karst. In urban areas, collapse sinkholes and subsidence can affect infrastructures, and a complete evaluation is needed to constrain the origin of surficial processes, their vertical development and the 3D geometry of the volume affected by underground karstification. The presented data represents an analysis carried out in the locality of Gallur, upstream of Zaragoza city, in the right bank of the Ebro thalweg. In the studied area a collapse has been affecting a main road during the last decades. The surficial analysis permits to identify a topographic depression affecting both the road and nearby areas, and a concentric semi-circular to elliptic distribution of cracks with centripetal sinking directions. Boreholes permit to identify a 15 m alluvial series over the evaporitic Cenozoic substratum. Carbonatic crusts, frequent within the alluvial deposits, can preclude the direct observation of subsidence phenomena and permit the development of near to the surface cavities, the strongest hazard in this situation. In order to define the 3D structure, a complete survey of the road and adjacent areas was carried out by means of GPR (100, 250 and 500 MHz antennas), together with geomorphological, historical and geotechnical analysis. This 3D model permitted to identify the area affected by karstic processes, and define the potential areas to be analyzed for reparations with mid-long term perspective. The obtained results permit to define a potential solution for urban planning and decision making when dealing with long term and dynamic geological processes where economic evaluations and hazard mitigation are needed.

### 6.8.2 (p) Utilisation des résidus de lavage des granulats de carrières dans l'élaboration de pièces céramiques (region de Tamazouzt, Maroc)

Hicham El Boudour El Idrissi<sup>1,2</sup>, Lahcen Daoudi<sup>2</sup>, Meriam El Ouahabi<sup>1</sup>, Frédéric Collin<sup>3</sup>, Nathalie Fagel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UR Argile, Géochimie et Environnement sédimentaires, Université de Liège, Belgique

<sup>2</sup>Laboratoire de Géosciences et Environnement, Département de géologie, faculté des sciences et techniques, Marrakech, Maroc

<sup>3</sup>Laboratoire de Géotechnologies, Département Argenco, Université de Liège, Belgique

Le site potier de Tamazouzt est situé à 40 km au Sud-Est de la ville de Marrakech. La production est sous forme de poterie décorative d'ustensiles rustiques. La matière première utilisée dans l'élaboration de ces produits est issue de résidus de lavage des carrières de granulats exploités le long des oueds. En plus de la qualité des produits et des rendements élevés, ce site donne un bon exemple de valorisation des résidus de lavage qui causent des problèmes pour l'environnement et pour les industriels. Nous avons caractérisé cette matière première afin d'en faire la promotion et d'encourager l'exploitation de tels matériaux dans le domaine de la céramique à l'échelle globale.

Les résultats des analyses montrent que la pâte est constituée de 62% d'argiles, 23% de limons et 15% de sables ; l'indice de plasticité est de l'ordre de 16. Pour 27% d'humidité, le degré de retrait au séchage ne dépasse pas 6%. La minéralogie indique la présence de quartz (32%), plagioclase (20%), feldspaths potassiques (10%), calcite (3%) et argile (31%). Les minéraux argileux sont constitués d'illite (16%), de chlorite (7%), de kaolinite (4%) et de vermiculite (4%). La teneur en matière organique est de 4%. La composition chimique est surtout silico-alumineuse (64% de SiO<sub>2</sub>, 17% d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Les autres éléments majeurs dont la teneur est significative (> 1%) sont : Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (8%), MgO (4%), K<sub>2</sub>O (3%), CaO (3%), Na<sub>2</sub>O (2%).

Les pièces cuites à 1050°C présentent 2% de retrait, 13% de porosité à l'eau, la résistance mécanique à la compression et à la flexion est respectivement de 63 et 20 Mpa. L'analyse DRX des pièces cuites à 1050°C a montré l'apparition de gélhénite, anorthite, diopside et d'hématite. Ces résultats indiquent qu'en plus de l'utilisation locale dans la poterie décorative ces argiles pourraient être valorisées comme matériaux de construction vue leur caractère isolant (bonne porosité), résistance (bon comportement mécanique) et leur couleur rouge (présence de l'hématite).

### 6.8.3 (p) La stabilité et l'évolution des cavités souterraines, sur l'exemple des carrières souterraines de Lille

Ghanem Ramadan<sup>1</sup>, Faten Rafeh<sup>1</sup>, Michel Dubois<sup>1</sup>, Hussein Mroueh<sup>1</sup>, Arnaud Gauthier<sup>1</sup>, Géraldine Berrehouc<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LGCgE, Lille

<sup>2</sup> Mairie de Lille

Les carrières souterraines de Lille, maintenant abandonnées, sont des exploitations de craie du Sénonien exploitées selon la méthode des chambres et piliers, en catiches (chambres en forme de bouteille) ou mixtes. La présence de ces cavités dans le tissu urbain actuel a un impact en matière de risques et sur l'usage de certains terrains sous-cavés. L'approche développée ici consiste à combiner des observations détaillées de terrain et l'application de la modélisation numérique à l'échelle de l'exploitation.

L'analyse structurale détaillée de la craie montre la présence de nombreuses fissures, diaclases et joints. Beaucoup de désordres (remontées de voûte, fontis, ruptures des piliers par écaillage, fissuration et rupture) ont été recensés. Ces désordres sont causés par plusieurs facteurs dont les plus importants sont l'effet des contraintes de couverture et l'effet de l'eau. L'eau a une incidence notamment sur la qualité de la craie et les traces de sa présence ont été recherchées. L'altération de la craie in situ se manifeste sous forme de dépôts de couleur rouille, patines, dépôts noircis. Les observations au MEB ont montré des modifications des caractéristiques de la surface de la craie (augmentation de la porosité, précipitation de calcite, modification de la composition de la craie).

Afin de maîtriser les risques encourus par les instabilités dans ces carrières souterraines, une étude de stabilité est effectuée. Cette dernière est basée sur la modélisation numérique de la structure souterraine comprenant des chambres et piliers, en tenant compte des différents aspects. Par conséquent, la présence de joints incorporés et les fractures, l'effet de l'eau, ainsi que l'effet du temps sont tous inclus dans le comportement de la craie. En plus, les variations de la géométrie de ces carrières sont considérées par l'exécution d'une étude paramétrique.

### 6.8.4 (p) Homogénéisation analytiques des renforts renforcés par des géotextiles sous sollicitations sismiques

Habib Trouzine<sup>1</sup>, Soumia Soufi<sup>1</sup>, Mohamed Fekirini<sup>1</sup>, Mouloud Hamhami<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Laboratoire de Génie Civil & Environnement, Université Djillali  
Liabés, Sidi Bel Abbés, Algérie*

Les ouvrages en remblai renforcé sont généralement des ouvrages relativement souples et déformables. L'objectif de papier est de présen-

ter quelques méthodes d'homogénéisation analytiquement des remblais renforcés par des géotextiles dans le cas d'un séisme en utilisant les techniques d'homogénéisation des milieux périodiques. Les résultats sont comparés avec ceux d'une simulation numérique et semblent être en bonne concordance.



## **Thème 7**

# **Ressources - *Resources***

Animateurs : Jean-Paul Callot (LFC-R, Pau), Didier Beziat (GET, Toulouse)



## 7.1 Stockage Géologique du CO<sub>2</sub> (Geologic storage of CO<sub>2</sub>)

### Responsables :

- Corinne Loisy (ENSEGID, Bordeaux)  
corinne.loisy@ensegid.fr
- Bruno Garcia (IFPEN)  
bruno.garcia@ifpen.fr

### Résumé :

La prise de conscience de la communauté internationale et la convergence des données scientifiques autour du réchauffement climatique rendent urgent le déploiement, dans le monde entier, des technologies favorisant la réduction des gaz à effet de serre. La technologie de captage et de stockage géologique du CO<sub>2</sub> constitue l'une des réponses adaptées à l'échelle du problème. Cette session se propose de faire le point sur les avancées technologiques, les recherches en cours et les premiers retours d'expérience des chantiers pilotes de stockages géologiques de CO<sub>2</sub>.

Plusieurs volets pourront se développer autour de cette session :

- *Le stockage à long terme du CO<sub>2</sub> dans les systèmes géologiques : résultats des études de laboratoire.* Tant sur le plan chimique que sur le plan pétrophysique, la circulation du CO<sub>2</sub> dans des réservoirs salifères ou d'anciens réservoirs d'hydrocarbures présente un comportement spécifique par rapport à d'autres systèmes qui ont été largement étudiés dans les domaines de l'ingénierie pétrolière, de l'hydrogéologie et des transports de contaminants. Les études expérimentales sont essentielles pour le développement de simulations précises des écoulements de CO<sub>2</sub> et de son piégeage dans le sous-sol. Dans cette session, nous cherchons des études qui soient purement expérimentales ou combinant l'expérimentale et la modélisation.
- *Les méthodes de terrain et l'analyse des données de terrain pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub>.* Cette session aborde la question des méthodes d'essais sur le terrain, d'analyse des données de terrain et de monitoring géochimique des sites dans le cadre de la caractérisation et de la surveillance des sites de stockage de CO<sub>2</sub>. Les différents aspects de tests sur le terrain, de progrès dans les techniques de mesures et de leurs applications, de progrès dans la compréhension des processus associés, du rôle de la modélisation dans l'évaluation des caractéristiques du site et de sa variabilité spatiale seront abordés.
- *Modélisation et problèmes de changement d'échelle appliqué aux stockages géologiques de CO<sub>2</sub>.* La modélisation des sites de stockage de CO<sub>2</sub> est nécessaire pour le fonctionnement efficace et la sécurité ainsi que l'évaluation des risques propres au site. Cette session vise à la discussion de la modélisation de stockage sur site de CO<sub>2</sub>.
- *Le monitoring géophysique des sites de stockages géologiques de CO<sub>2</sub>.* Les méthodes géophysiques jouent un rôle clé pour l'étude non invasive et la caractérisation spatiale et temporelle des sites souterrains de stockage de CO<sub>2</sub> et ceci dans les différentes phases de fonctionnement d'un site de stockage. L'accent de cette session est mis sur les principes, les capacités et les applications des différentes techniques géophysiques dans le cadre de la caractérisation et de la surveillance des stockages géologiques de CO<sub>2</sub>.

### Abstract :

Awareness of the international community and the convergence of scientific data about global warming imply an urgent deployment around the world of technologies that promote the reduction of greenhouse gas emissions. Capture and geological storage of CO<sub>2</sub> technology is one of the appropriate solution for this problem. This session offers an update on technological advances, current research and early feedback from pilot sites of geological storage of CO<sub>2</sub>. Several components can be developed around this session :

The long-term storage of CO<sub>2</sub> in geological systems : results of laboratory studies. Both chemical and petrophysical point of view, circulation of CO<sub>2</sub> in salt reservoirs or depleted hydrocarbon reservoirs present a specific behavior compared to other systems that have been extensively studied in the fields of engineering oil, hydrogeology and contaminants transport. Experimental studies are essential for the development of well-adapted simulations of CO<sub>2</sub> displacement and its sequestration. In this session, we look for studies that are purely experimental or combining experimental and modeling ;

Field methods and analysis of field data for the geological storage of CO<sub>2</sub>. This session addresses the issue of testing field methods, analysis of field data and geochemical monitoring sites in the context of the characterization and monitoring of CO<sub>2</sub> storage sites. The various aspects of field tests, progress in measurement techniques and their applications, progress in understanding the processes associated and the role of modeling in the evaluation of site characteristics and its spatial variability will be discussed ; Modeling and problems of scaling applied to geological storage of CO<sub>2</sub>. Modeling of CO<sub>2</sub> storage sites is necessary for the efficient operation and safety and risk assessment, site-specific. This session aims at discussing the modeling of on-site storage of CO<sub>2</sub> ;

The geophysical monitoring of geological CO<sub>2</sub> storage sites. Geophysical methods play a key role for noninvasive study and the spatial and temporal characterization of underground CO<sub>2</sub> storage sites, for all the different phases of operation. This session is focused on the principles, capabilities and applications of various geophysical techniques in the characterization and monitoring of geological storage of CO<sub>2</sub>.

### 7.1.1 *Keynote communication* : Les capacités de stockage en CO<sub>2</sub> : besoins et volumes identifiés

Sylvain Thibeau<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

L'Agence Internationale de l'Energie a défini des scénarios d'émission de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050 (Technology Roadmap - Carbon Capture & Storage - 2013).

Pour maintenir la hausse moyenne des températures à 2° (scénario 2DS), le CCS devrait contribuer à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de l'ordre de 8 Gt par an en 2050, avec des quantités cumulées de 19.2 Gt pour l'Amérique du Nord, 12.2 Gt en Europe, 42.2 Gt en Chine et 11.6 Gt en Inde. Dans les principales sources disponibles (USA, Canada, Europe, Chine), la plus grande partie des capacités de stockage se situent dans des aquifères salins. Ces capacités restent largement surestimées par l'utilisation de coefficients d'efficacité de stockage (pourcentage du volume de l'aquifère qui pourra être remplie de CO<sub>2</sub>) très élevés qui n'intègrent pas les surpressions induites par des injections massives dans un milieu très peu compressible.

En corrigeant les atlas existants de ces surestimations, des résultats très contrastés par région sont obtenus

- aux USA, les capacités de stockages permettraient d'injecter le CO<sub>2</sub> sans soutirer l'eau pour contrôler les surpressions
- En Europe, en supposant que le stockage serait déployé essentiellement en Mer du Nord, les capacités identifiées font que le soutirage de l'eau de formation serait nécessaire, ce qui soulève d'autres questions.
- En Chine, des capacités de stockage notionnelles très optimistes ont été publiées par bassin, et la difficulté de l'accès aux données rend difficile l'établissement d'estimations plus fiables.

Il semble donc impératif de fiabiliser les capacités de stockage en aquifère, en prenant en compte les impacts en pression. Ceci devrait permettre de savoir si les objectifs de stockage de l'IEA par continent sont réalistes et si elles nécessiteront une extraction d'eau massive des aquifères considérés.

### 7.1.2 (o) Capacité effective de stockage géologique du CO<sub>2</sub> dans le bassin de l'Ahnet Gourara cas du champ C1

Abdelouhab AKTOUF<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, Alger, Algérie

Le bassin sédimentaire de l'Ahnet Gourara est celui qui présente le plus grand potentiel pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub> dans le sud ouest Algérien. Ce bassin contient d'excellents ensembles réservoir-couverture, une grande quantité de données sismiques et de puits est disponible, l'accessibilité est facile et les infrastructures sont bien développées. De plus, des aquifères salins sont présents en profondeur au sein de la séquence sédimentaire et constituent les cibles pour le stockage du CO<sub>2</sub>. La capacité effective de stockage géologique du CO<sub>2</sub> dans les aquifères salins du champ gazifère C1 bassin de l'Ahnet Gourara a été effectuée à l'aide d'un modèle géologique 3D qui a permis de calculer les volumes des unités d'intérêt de même que de calculer la densité du CO<sub>2</sub> en tout point du modèle en fonction des gradients de température et de pression. La capacité effective des formations de Siegenian et du Gedinnian a été calculée à l'aide de la densité du CO<sub>2</sub>, de la porosité moyenne des unités géologiques, du volume de ces unités et des facteurs d'efficacité pour le stockage du CO<sub>2</sub> dans les aquifères salins.

Les facteurs d'efficacité utilisés dans le calcul de la capacité sont définies dans la séquestration du carbone Atlas des États-Unis et au Canada et vont de 0,51% à 5,4% dans les unités sédimentaires clastiques. Deux modèles géologiques 3D du champ ont été utilisés pour représenter les unités de réservoirs potentiels à l'échelle du bassin : uniforme sans faille et avec. Cela a permis de calculer le volume des réservoirs potentiels et la comparaison de la capacité d'un bassin uniforme à grande échelle d'un bassin en défaut compartimenté par des failles normales existantes.

### 7.1.3 (o) Le Pilote de Démonstration de captage-stockage du CO<sub>2</sub> de Lacq-Rousse : retour sur les aspects stockage

Sylvain Thibeau<sup>1</sup>, Eric Gaucher<sup>1</sup>, Nadège Labat<sup>1</sup>, André Marblé<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

Total a opéré un pilote de captage-stockage du CO<sub>2</sub> dans le sud-ouest de la France. Le CO<sub>2</sub> a été capté sur l'une des chaudières de la plateforme industrielle de Lacq, puis transporté dans un gazoduc jusqu'au puits d'injection, Rousse-1, à Jurançon. Le CO<sub>2</sub> a été injecté via le puits qui avait produit le gaz contenu dans la formation Dolomie de Mano de la structure de Rousse. 51000 tonnes de CO<sub>2</sub> ont ainsi été captées et stockées.

La phase de sélection du site de stockage a constitué à identifier, parmi les gisements de gaz de la région, celui avec les caractéristiques les mieux adaptés. Les critères utilisés étaient la quantité de gaz extraite, les débits de production, la baisse de pression du réservoir, la disponibilité d'infrastructure de transport du gaz et le nombre de puits pénétrant la formation cible. Une fois sélectionnée, un processus de qualification de la Dolomie de Mano de Rousse a été mis en place, constitué d'une séquence d'études standard pour l'industrie pétrogazière (interprétation géophysique, modélisation géologique et modélisation dynamique des réservoirs en vue de prédire le comportement du réservoir suite à l'injection du CO<sub>2</sub>), et d'une série d'études avancées liées au pilote de démonstration du stockage de CO<sub>2</sub> (modélisations géochimique et géomécanique, migration du CO<sub>2</sub>). De nombreuses études ont été réalisées en partenariat avec des instituts français et internationaux.

Un programme de monitoring spécifique au site a été conçu puis déployé, combinant plusieurs technologies visant à 1/ surveiller l'environnement autour du site 2/ monitorer le réservoir de stockage 3/ vérifier l'absence de sismicité induite par l'injection de CO<sub>2</sub> dans la pile sédimentaire 4/ valider le comportement du puits en injection.

Suite à cette opération de stockage réussie, le site est maintenant en phase post-injection de surveillance, avant la réalisation du bouchage définitif du puits d'injection.

### 7.1.4 (o) Surface and near surface geochemical surveying of a CO<sub>2</sub> injection pilot : application study to the French Pyrenean foreland (Rousse CCS pilot)

Frédéric Gal<sup>1</sup>, Zbigniew Pokryszka<sup>2</sup>, Stéphane Lafortune<sup>2</sup>, Karine Michel<sup>1</sup>, Régis Farret<sup>2</sup>, Nadège Labat<sup>3</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>INERIS, Verneuil-en-Halatte

<sup>3</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

The SENTINELLE research project was supported by the French Research Agency. The first aim was to determine, for a given site, the different natural gas sources, and to quantify gas exchange and flux between compartments. The second objective of the project was to propose a methodology for 3D survey of a CO<sub>2</sub> storage site. The results will lead to establish CO<sub>2</sub> and trace gases flow/amount reference baselines and gas traceability.

For that, the subsurface site of Rouse Pilot was provided by TOTAL Exploration Production France. The site was used to acquire data on gas concentrations and flux in near surface compartments : geosphere (soil, superficial aquifers), biosphere and atmosphere. The geochemical monitoring of the geosphere extended over a 5 years-long time period. The monitoring consisted in the acquisition at fixed frequency of soil gas concentrations and fluxes at perennial sampling points, coupled with the study of the geochemical evolution of a perched aquifer overlying the storage reservoir through a 85 m depth borehole. Baseline data were acquired between September 2008 and December 2009 then the monitoring shifted to surveying mode during the operating phase that ended in March 2013.

No deviation occurred in soil gas and flux compositions and ranges when comparing baseline data to injection monitoring data. Changes that existed over the year and over years were due to seasonal and climatic effects inducing variable biological activities in soils. The monitoring of subsurface aquifer showed changes that were not related to the injection process but they are complex to delineate. As the borehole was not purged prior to be monitored, its lower part was imprinted by relict effects of drilling activities. The main screened part had a more conventional functioning where sudden changes were linked to karstic-like behavior. The top of the aquifer was influenced by exchanges with the overlying atmospheric air existing in the cased part of the borehole.

### 7.1.5 (o) Geochemical monitoring of the dynamic of dissolved carbon in a karst aquifer, located above the Rouse site test for CO<sub>2</sub> geological storage

Yohann Staniszewski<sup>1</sup>, Alexis Groleau<sup>1</sup>, Didier Jézéquel<sup>1</sup>, Pierre Agrinier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

A near surface perched karst aquifer is used as an integrative system of putative CO<sub>2</sub> leaks above the Rouse site test of CO<sub>2</sub> storage (Total - Pau - France). The local geology of the aquifer is an alternation of clay and conglomerate carbonate formations. This formation has been recognized as a karst [1].

We develop a new low cost and long term geochemical method for monitoring the natural dynamic CO<sub>2</sub>. The aim is to describe the natural forcings that drive the dynamics of the dissolved carbon and what can be determined as an anomaly. We follow the geochemistry of the aquifer by focusing on 4 springs distributed in the vicinity of the injection site. The chemical composition of the groundwater is ultra-dominated by calcium and bicarbonate ions. Data on these main springs are obtained with :

- high frequency (HF) measurements (15') of conductivity (C25), pH, rainfall and water flow. C25 and pH are used to determine the dissolved carbonate system : pH, pCO<sub>2</sub>, alkalinity & DIC.

- bi-monthly geochemical and isotopic samples : majors ions, traces, alkalinity, DIC, DOC, δ<sup>13</sup>CDIC, δ<sup>18</sup>O.

We show that the C25 is a very robust proxy of the alkalinity as a strong linear relation is established for all the meteorological conditions. After four years of monitoring, the dominant natural forcing of dissolved carbon is dominantly the interactions between organic matter, carbonate minerals, and CO<sub>2</sub> gas phase which are driven by the hydrodynamic. Isotopic data allow to display the variable contributions of the different sources of C to DIC.

Modelisation of the geochemical impact induced by an input of CO<sub>2</sub> in the aquifer is in progress, using the software PHREEQC [2].

[1] Séguier, R. [2009] Contexte hydrogéologique des coteaux de Jurançon, Université de Pau, 56 p.

[2] Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., (1999) U.S. Geol. Surv. Water Resour. Invest. Rep. 9

### 7.1.6 (o) Monitoring a 120-kg CO<sub>2</sub> injection in a coal seam with continuous gas and microseismic measurements (European RFCS CARBOLAB research project)

Stéphane Lafortune<sup>1</sup>, Francis Adeline<sup>1</sup>, Franz Lahaie<sup>1</sup>, Benoît Beaufils<sup>1</sup>, Gaëtan Bentivegna<sup>1</sup>, Christophe Didier<sup>1</sup>, Régis Farret<sup>1</sup>, Philippe Gombert<sup>1</sup>, Zbigniew Pokryszka<sup>1</sup>, Noel Canto Toimil<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INERIS, Verneuil-en-Halatte

<sup>2</sup>Hulleras del Norte S. A. (HUNOSA), Oviedo, Asturias, Espagne

The main goal of the CARBOLAB research project was to fill the gap concerning the lack of data and comprehension of the physicochemical mechanisms that exist between laboratory experiments on gas adsorption properties of coal and full-scale CO<sub>2</sub> injection tests from the surface. Gathering Spanish (HUNOSA, AITEMIN), French (BRGM, INERIS) and Polish (GIG) partners, the project contained three main actions : laboratory tests, numerical modelling and in-situ injection at a seam scale. The injection site was within an existing underground infrastructure, a crosscut of a coal mine located in Asturias (North of Spain). HUNOSA built an experimental site by drilling 21 boreholes from a crosscut that intersects an unexploited 2-m width vertical coal. Geochemical and geophysical monitoring boreholes were drilled in coal close to the injection point and in the surrounding rock strata. INERIS performed passive seismic monitoring, continuous gas monitoring in boreholes, and also gas flux measurements at the floor and on the wall of the crosscut.

We will here present our monitoring plan, describe our equipments and discuss data from baseline, injection and post-injection phases. Data from passive seismic monitoring show a correlation between microseismic activity recorded in the monitored zone and the variations in CO<sub>2</sub> injection pressure. Data from gas monitoring show CH<sub>4</sub> (initial gas in place) and CO<sub>2</sub> concentration variations in time both in coal and surrounding rocks. Flux measurements helped us to determine CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> quantities leaking from the rock mass to the crosscut.

Monitoring equipments have highlighted two main leakage pathways. Due to leakage, gas migration was not monitored in coal because the quantity of CO<sub>2</sub> really injected in coal (~ 120 kg) created a plume whose radius was smaller than expected by modelling and therefore gas didn't reach the monitoring boreholes.

Here, passive seismic monitoring and continuous gas monitoring proved to be valuable tools to observe gas migration and the behaviour of the rock during the injection test. They also helped us to understand the discrepancies between observations and predictions. Therefore the results will help us to draw recommendations and to design future in-situ injection operations in coal, as well as CO<sub>2</sub>-enhanced coal bed methane recovery (CO<sub>2</sub>-ECBM) operations.

### 7.1.7 (o) Impact d'une fuite simulée de CO<sub>2</sub> dans l'aquifère de la craie (Catenoy, Oise)

Philippe Gombert<sup>1</sup>, Zbigniew Pokryszka<sup>1</sup>, Stéphane Lafortune<sup>1</sup>, Julie Lions<sup>2</sup>, Frédéric Gal<sup>2</sup>, François Prévot<sup>3</sup>, Yacine Darmoul<sup>3</sup>, Solenne Grellier<sup>4</sup>, Patrice Squarcioni<sup>5</sup>

<sup>1</sup>INERIS, Verneuil-en-Halatte

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

<sup>3</sup>IPG Paris

<sup>4</sup>Veolia Environnement Recherche et Innovation, Paris

<sup>5</sup>HYDRO INVEST, Champniers

Les fuites potentielles de CO<sub>2</sub> hors d'un site de stockage profond sont souvent citées comme un risque pour les ressources aquifères sus-jacentes. Pour l'évaluer, le programme de recherche CIPRES (Caractérisation des Impacts Potentiels du stockage géologique du CO<sub>2</sub> sur la

qualité de la Ressource en Eau Souterraine) a été monté avec financement de l'ANR. L'INERIS a mis à disposition du programme un site expérimental implanté à Catenoy (Oise), dans la nappe de la craie, afin d'y simuler une fuite de CO<sub>2</sub>. Le site comprend 1 forage d'injection, 9 piézomètres et 5 piézajais.

Dans le cadre du programme CIPRES, des opérations ont été réalisées en 2013 préalablement à la simulation d'une fuite de CO<sub>2</sub> : 1) pompage d'essai pour la caractérisation hydrodynamique du site, 2) injection de traceurs pour calibrer le dispositif d'injection et préparer le protocole de suivi, 3) mesures gazeuses pour établir la ligne de base des teneurs en CO<sub>2</sub> (dans la zone non saturée et le sol) et le flux de CO<sub>2</sub> à l'interface sol-atmosphère, 4) prélèvements d'eau pour caractériser le faciès hydrogéochimique de la nappe. Nous présentons ici la mise en place de la simulation de fuite, du monitoring (dont un dispositif innovant de mesure en continu du pH et de l'alcalinité par méthode spectrophotométrique visible) et les premiers résultats.

La simulation de fuite a eu lieu en octobre 2013 par l'injection de 10 m<sup>3</sup> d'eau préalablement saturée en CO<sub>2</sub> à pression atmosphérique. Le suivi a montré un faible impact sur le pH, l'alcalinité et la conductivité de l'eau de la nappe jusqu'à 20 m de distance en aval du forage d'injection. Par contre, aucune variation significative des flux gazeux dans la zone non saturée, dans le sol ou à l'interface sol-atmosphère n'a été mise en évidence. Tout en montrant le rôle tampon que peuvent jouer les aquifères carbonatés en cas de fuite de CO<sub>2</sub>, ces résultats renforcent la pertinence d'une surveillance mixte (zone saturée et non saturée) à la surface des futurs sites de stockage de CO<sub>2</sub>.

### 7.1.8 (o) Projet Demo-CO<sub>2</sub> : étude expérimentale des simulations de fuites de CO<sub>2</sub> et de traceurs inertes dans la zone non saturée sur un site pilote naturel

Jean Rillard<sup>1</sup>, Corinne Loisy<sup>1</sup>, Adrian Cerepi<sup>1</sup>, Olivier Le Roux<sup>1</sup>, Sonia Noirez<sup>2</sup>, Virgile Rouchon<sup>2</sup>, Philippe Delaplace<sup>2</sup>, Bruno Garcia<sup>2</sup>, Olivier Willequet<sup>3</sup>, Claude Bertrand<sup>4</sup>

<sup>1</sup>GEORESSOURCES ET ENVIRONNEMENT, Pessac

<sup>2</sup>IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison

<sup>3</sup>DIMELCO, Vendeville

<sup>4</sup>ALGADE, Bessines sur Gartempe

Le projet Demo-CO<sub>2</sub> s'inscrit dans la problématique de surveillance des sites de stockage géologiques. Des méthodes de détection des fuites de CO<sub>2</sub> dans les environnements proches de la surface et la zone non saturée doivent être mises en place. Dans ce but, une expérience de fuite de CO<sub>2</sub> a été réalisée à 3,7 m de profondeur à partir d'une chambre d'injection de 20cm<sup>3</sup> dans une zone non saturée carbonatée. Un volume de 3m<sup>3</sup> de gaz constitué de 90% CO<sub>2</sub>, 5% He et 5% Kr a été injecté pour simuler une fuite. Le suivi en continu des concentrations en CO<sub>2</sub>, He et Kr a été réalisé via des sondes réparties entre 0,15m et 2,2m de profondeur, au-dessus et dans un rayon de 2 m autour de la chambre d'injection. Les mesures de gaz ont été couplées à des mesures de température, d'humidité relative, et géo-électriques en surface. Des pics d'arrivées de CO<sub>2</sub> ont été observés après quelques heures dans certaines des sondes les plus éloignées autour de la chambre d'injection, à environ 3,5m. Par ailleurs les pics d'arrivées les plus longs (environ 12 jours) ont été observés dans les sondes situées 1,2m au-dessus de la chambre d'injection. Les pics de concentration en CO<sub>2</sub> sont compris entre 15% et 1% du volume total. Les temps d'arrivées d'He et Kr sont en moyenne 2 à 3 fois plus courts que le CO<sub>2</sub>, du fait d'une interaction (dissolution, réaction chimique, dispersivité, etc.) plus faible avec le milieu poreux et de leurs propriétés diffusives plus intéressantes. Ces résultats montrent que le transfert des gaz vers la surface s'effectue par des passages préférentiels complexes induits par l'hétérogénéité naturelle du sous-sol, tels des micro-fractures, contraste de porosité, etc. Ces résultats illustrent

par ailleurs l'utilité d'utiliser des gaz rares tels que Kr et He comme traceurs inertes des fuites de CO<sub>2</sub>.

### 7.1.9 (o) Suivi de la diffusion de CO<sub>2</sub> au sein d'un massif calcaire non saturé à partir de mesures géoélectriques

Olivier Le Roux<sup>1</sup>, Miloud Chermali<sup>1</sup>, Jean Rillard<sup>1</sup>, Grégory Cohen<sup>1</sup>, Corinne Loisy<sup>1</sup>, Adrian Cerepi<sup>1</sup>, Sonia Noirez<sup>2</sup>, Philippe Delaplace<sup>2</sup>, Virgile Rouchon<sup>2</sup>, Bruno Garcia<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GEORESSOURCES ET ENVIRONNEMENT, Pessac

<sup>2</sup>IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison

Une des principales qualités d'un site géologique de stockage de CO<sub>2</sub> doit être de présenter une probabilité de fuites minimale. Il a ainsi été récemment proposé qu'un taux de 0,01%/an de fuite de CO<sub>2</sub> serait considéré comme risque maximum toléré au droit d'un site de séquestration géologique de CO<sub>2</sub>. Il apparaît donc nécessaire de mettre en place des systèmes de surveillance géochimique et géophysique des sites de stockages géologiques de CO<sub>2</sub> pour détecter ces fuites, évaluer leur importance et prévoir d'éventuelles actions correctives. L'objectif de cette étude est de tester la sensibilité de la résistivité électrique vis-à-vis de la concentration en CO<sub>2</sub> au sein du massif carbonaté. Ce projet est mené au sein d'anciennes carrières souterraines en Gironde. Ces carrières, localisées au sein du calcaire Oligocène supérieur, servent de laboratoire souterrain permettant un accès au cœur du massif.

Deux expériences de fuite diffuse de CO<sub>2</sub> ont été menées à 2 profondeurs différentes. La première, 7 m sous la surface a été réalisée en décembre 2012 à partir d'une cavité souterraine confinée. La seconde a été menée à partir d'un forage à 3.5 m de profondeur en mars 2014. Plusieurs profils de tomographie de résistivité électrique ont été implantés dans le massif et en surface avant, pendant et après ces deux injections de manière à suivre l'évolution de la résistivité électrique au cours du temps. Après correction des variations de saturation et de température, ces mesures ont été calibrées en fonction de la mesure en CO<sub>2</sub> des sondes géochimiques. Il est ainsi possible de mettre en évidence une anti-corrélation entre résistivité électrique et concentration en CO<sub>2</sub>. Le principal avantage de cette méthode géophysique est de permettre de suivre l'évolution du panache de CO<sub>2</sub> à l'intérieur du massif de manière non destructive.

### 7.1.10 (o) Impact of an experimental CO<sub>2</sub> diffusive gas leakage on a carbonate reservoir system in unsaturated zone - a 1D reactive gas transport model

Grégory Cohen<sup>1</sup>, Corinne Loisy<sup>1</sup>, Michel Franceschi<sup>1</sup>, Olivier Le Roux<sup>1</sup>, Bruno Garcia<sup>2</sup>, Virgile Rouchon<sup>2</sup>, Philippe Delaplace<sup>2</sup>, Adrian Cerepi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEORESSOURCES ET ENVIRONNEMENT, Pessac

<sup>2</sup>IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison

Numerical simulations of an atypical experiment of CO<sub>2</sub> and tracers diffusive gas leakage, carried out in a carbonate vadose zone, were performed. The aim of these simulations was to highlight the impact of the CO<sub>2</sub> diffusive leakage experiment on water and limestone geochemical and petrophysical properties. The simulations were achieved using a 1D diffusive gas transport model programmed in Python coupled with the aqueous geochemical modelling code PHREEQC. The characterisation of the porous media was achieved using petrophysical (Hg-porosimetry and analysis of images from microscopy) and chemical (XRD, calcimetry and BET measurements) criteria. This work also focuses on the theoretical chemical reactions which occurred during the diffusive gas leakage experiment, their kinetics and the main parameters which are

involved in a carbonate unsaturated zone to buffer a CO<sub>2</sub> diffusive leakage. The dissolution was investigated in a carbonate porous media with a porosity of 25-40 %, water saturation of 25-90 % and calcite surface over water volume (A/V) ratio of 10<sup>5</sup>-10<sup>9</sup> m<sup>-1</sup>. The results show that dissolution has a weak influence on global gas transport and that limestone petrophysical characteristics are impacted depending on water content (defined by water saturation and porosity) and A/V ratio. The study also highlights that CO<sub>2</sub> vertical transport in the vadose zone is driven by advection while lateral transport can be ascribed to diffusion. A CO<sub>2</sub> leakage in a carbonate vadose zone could lead to the modification of limestone porosity distribution, increasing macroporosity where gas transfers and decreasing mesoporosity filled with water.

### 7.1.11 (p) Évaluation du potentiel de séquestration géologique du CO<sub>2</sub> des bassins sédimentaires du sud-ouest Algérien

Abdelouahab AKTOUF<sup>1</sup>, Abdelhakim Bentellis<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie

La plate-forme saharienne Algérienne se caractérise par la juxtaposition de bassins sédimentaires intra-cratoniques orientés N-S à NO-SE, séparés entre eux par des môles de même orientation. La région Ouest de la plate-forme saharienne englobe plusieurs bassins sédimentaires caractérisés par une grande production de gaz sec avec des taux de CO<sub>2</sub> dépassant parfois les 9%. Dans le but de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> ces bassins sont analysés afin de déterminer les quels offrent le plus grand potentiel pour la séquestration géologique du CO<sub>2</sub>. La méthodologie pour évaluer le potentiel des bassins utilise des critères qualitatifs à la fois géologiques et pratiques auxquels on a assigné des valeurs numériques normalisées afin de pouvoir faire une comparaison quantitative objective entre les bassins. Les bassins analysés sont : l'Ahnet-Gourara, Bechar, Reggane, Tindouf, et cuvette de Sbaa.

Le bassin de l'Ahnet-Gourara démontre, de loin, le plus grand potentiel pour la séquestration géologique du CO<sub>2</sub>. Les bassins de Bechar et de Tindouf démontrent un potentiel intéressant du point de vue géologique, mais les critères pratiques (infrastructures, accessibilité, sources de CO<sub>2</sub>) sont moins favorables au développement de projets de séquestration du CO<sub>2</sub>. Finalement, les bassins cambro-ordoviciens de Reggane et de la cuvette de Sbaa offrent un potentiel moyen de par leur géologie plus complexe et l'intensité de la déformation des roches.

### 7.1.12 (p) Modélisation 3D de l'ensemble du Mésozoïque du Nord de la Lorraine dans le cadre du projet Ulcos TGR-BF.

Anne-Gaëlle Bader<sup>1</sup>, Sandrine Grataloup<sup>1</sup>

<sup>1</sup> BRGM, Orléans

Le projet TGR-BF, soutenu par l'ADEME, avait pour objet la préparation d'un démonstrateur complet de captage, transport et stockage du CO<sub>2</sub> à une échelle industrielle. Le projet inclut l'étude des possibilités de stockage géologique dans le nord de la Lorraine, à proximité de l'usine sidérurgique de Florange. Il s'agit d'évaluer les possibilités de stockage (capacités) ainsi que les risques et impacts associés. Suite aux études préliminaires, les grès du Trias inférieur ont été ciblés comme réservoir pour le stockage.

Dans ce cadre, une modélisation géologique à l'échelle du complexe de stockage a été effectuée. Il s'agit ici de considérer dans un modèle 3D non seulement le réservoir et sa couverture mais également l'ensemble de la pile sédimentaire sus-jacente. Ceci afin d'avoir un outil permettant

d'appréhender et par la suite d'évaluer l'ensemble des impacts potentiels lors de l'injection et de la séquestration du CO<sub>2</sub> sur plusieurs centaines d'années.

Un modèle géologique de la région a été élaboré en intégrant toutes les données disponibles sur la zone, à savoir, forages pétroliers et issus de la Banque du Sous-Sol, interprétations sismiques disponibles, schéma structuraux mis à jour, géologie de surface (affleurements) et des modèles géologiques et hydrogéologiques préexistants.... et d'établir une géométrie cohérente et fiable des principales surfaces géologiques pertinentes pour le projet. Le modèle final permet d'estimer les épaisseurs, le pendage des couches, la présence de failles et une estimation des écoulements de saumure dans les étages géologiques qui nous intéressent. Un tel modèle constituera en outre un apport notable à la connaissance géologique de cette partie du bassin et pourra être valorisé dans le cadre d'études dédiées aux stockages d'énergie, à la géothermie, à la gestion des ressources en eau...

### 7.1.13 (p) An experimental approach to adsorption of CO<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> gas mixtures onto coal (European RFCS CARBOLAB research project)

Stéphane Lafortune<sup>1</sup>, Francis Adeline<sup>1</sup>, Gaëtan Bentivegna<sup>1</sup>, Christophe Didier<sup>1</sup>, Régis Farret<sup>1</sup>, Philippe Gombert<sup>1</sup>, Candice Lagny<sup>1</sup>, Zbigniew Pokryszka<sup>1</sup>, Noel Canto Toimil<sup>2</sup>

<sup>1</sup> INERIS, Verneuil-en-Halatte

<sup>2</sup> Hulleras del Norte, Oviedo, Asturias, Espagne

The main goal of the CARBOLAB research project was to fill the gap concerning the lack of data and comprehension of the physicochemical mechanisms that exist between laboratory experiments on gas adsorption properties of coal and full-scale CO<sub>2</sub> injection tests from the surface. Gathering Spanish (HUNOSA, AITEMIN), French (BRGM, INERIS) and Polish (GIG) partners, the project contained three main actions : laboratory tests, numerical modelling and in-situ injection at a seam scale. The injection site was within an existing underground infrastructure, a crosscut of a coal mine located in Asturias (North of Spain). The objectives of laboratory tests performed in the CARBOLAB project were to determine the intrinsic parameters of coal samples to help to forecast the performance of the targeted coal seam concerning coal bed methane recovery and CO<sub>2</sub> storage. Coal samples were collected in situ from the wall of the crosscut. Adsorption isotherms have been determined through gravimetric experiments to assess quantities of gas that can be adsorbed or desorbed. Kinetics of exchanges between adsorbed and free gas phases have been calculated using the linear driving force model. Adsorption experiments have been determined for pure gas phases (CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>) and binary gas mixtures (5 types of CO<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> mixtures). All experiments have been performed at 298 K (25°C). Here, we will see that CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> adsorption capacities determined with pure gas phases cannot be added to determine the total adsorption capacity of a gas mixture ; and that both CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> adsorption capacities for experiments performed with gas mixtures are lower than those determined for experiments with pure gases. These results confirm that both gas compete to adsorb onto coal.

We will also see that the extended Langmuir model that is often used to model sorption of binary gas mixtures does not fit our experimental data because the extended Langmuir model underestimates the adsorption capacities of CO<sub>2</sub> for experiments performed with binary gas mixtures having a CO<sub>2</sub> concentration ≤ 50 vol. % ; and underestimates the adsorption capacities of CH<sub>4</sub> for experiments performed with binary gas mixtures having a CO<sub>2</sub> concentration < 50 vol. %. We will propose a new equation that fit our experimental results and that can be used in numerical codes.

### 7.1.14 (p) Séquestration minérale du CO<sub>2</sub> dans les basaltes : mise en évidence d'une réactivité plus importante de l'olivine dans les roches que sur minéraux purs

Olivier Sissmann<sup>1</sup>, Fabrice Brunet<sup>2</sup>, Isabelle Martinez<sup>3</sup>, François Guyot<sup>4</sup>, Anne Verlaquet<sup>5</sup>, Yves Pinquier<sup>6</sup>, Bruno Garcia<sup>1</sup>, Damien Daval<sup>7</sup>

<sup>1</sup>IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison

<sup>2</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>3</sup>IPG Paris

<sup>4</sup>IMPMC, Paris

<sup>5</sup>iTeP, Paris

<sup>6</sup>Laboratoire de géologie de l'ENS, Paris

<sup>7</sup>LHyGeS, Strasbourg

La formation de carbonates constitue une option pérenne de séquestration géologique du dioxyde de carbone, susceptible de participer significativement à la réduction des émissions d'origine anthropique. Des incertitudes subsistent toutefois concernant les temps caractéristiques mis en jeu au cours des processus de carbonatation. Grâce à des expériences en réacteur, nous avons étudié le processus de carbonatation de l'olivine ((Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) à 150°C et pCO<sub>2</sub> = 280 bars. Ce minéral est l'une des principales phases des péridotites et des basaltes, contenant une forte quantité de cations divalents pour former des carbonates.

En comparant les vitesses et les taux de carbonatation d'olivine de San Carlos (Fo88) et d'olivine dans du basalte (Fo85), nous montrons qu'à surfaces réactives équivalentes, la vitesse de carbonatation de l'olivine est environ 40 fois supérieure pour les échantillons de basalte que pour l'olivine prise isolément. À l'aide de l'observation en MET de lames FIB coupées sur la surface des minéraux, nous montrons, dans le cas du basalte, que la couche nanométrique de silice amorphe qui s'est formée en surface de l'olivine est poreuse et contient des quantités significatives d'aluminium et de fer, contrairement à celle formée en surface de l'olivine ayant réagi séparément. La présence de ces éléments pourrait ainsi modifier les propriétés de transport des cations et protons à travers la couche.

Nous proposons donc que la composition de l'environnement chimique du minéral influe fortement sur le processus de dissolution-carbonatation, via la formation des phases nanométriques à l'interface eau-minéral. Les données obtenues en laboratoire sur la carbonatation de l'olivine sont ainsi susceptibles de donner des rendements sous-estimant le potentiel de carbonatation des roches basaltiques. Plus généralement, cette étude remet en question l'approche qui consiste à évaluer le potentiel de carbonatation d'une roche à partir d'expériences sur minéraux séparés.

### 7.1.15 (p) Mise en application et validation d'un dispositif de surveillance des flux naturels de CO<sub>2</sub> au niveau du sol - le prototype ESCORT

Zsuzsanna Szabo<sup>1</sup>, Virgile Rouchon<sup>1</sup>, Bruno Garcia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison

Lors d'opération de stockage géologique de CO<sub>2</sub>, des fuites peuvent intervenir en subsurface suite à (i) une évolution imprévue du réservoir naturel suite aux pratiques industrielles et/ou à des phénomènes naturels, (ii) une défaillance d'infrastructures ou (iii) au transport de produits (pipelines, réservoir, déversements...) engendrant à la surface des pollutions. Dans ces trois cas de figures, un impact au sol est à prévoir. L'activité respiratoire dans les sols génère des flux d'espèces gazeuses

entre l'atmosphère et le sol, principalement de dioxygène et de dioxyde de carbone. Le méthane et le dihydrogène font également partie des espèces mises en jeu, mais à des niveaux de plusieurs ordres de grandeur inférieurs. Ces échanges gazeux sont conditionnés par la disponibilité des différents substrats nécessaires aux activités microbiennes, ainsi que par les propriétés intrinsèques du sol conditionnant le transport (convectif et diffusif) des espèces gazeuses. Des pollutions au niveau du sol peuvent engendrer des modifications de ces flux gazeux, par la modification des conditions naturelles de la respiration, mais aussi par la superposition de flux non-respiratoires.

IFPEN travaille depuis plusieurs années sur un projet de station d'acquisition multi paramètres dédiée à la caractérisation des transferts de fluides dans les sols et à la caractérisation de fuites de gaz depuis la subsurface vers l'atmosphère. La station ESCORT permet d'assurer un suivi continu et autonome des conditions météorologiques locales, des flux de surfaces en CO<sub>2</sub>, de la concentration en gaz des sols à plusieurs profondeurs en CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et H<sub>2</sub>, de la saturation en eau du sol sur un profil de profondeur étendu, ainsi que de la température à plusieurs profondeurs. Ainsi, ESCORT permet de contraindre l'essentiel des paramètres régissant le transport des espèces gazeuses dans la zone non saturée. Ce poster présentera la mise en œuvre de la station ESCORT et son déploiement sur un site expérimental.

### 7.1.16 (p) Assessing CO<sub>2</sub> adsorption capacities onto shales through gravimetric experiments : a first step in the feasibility study of coupling « fracking » with carbon storage

Stéphane Lafortune<sup>1</sup>, Francis Adeline<sup>1</sup>, David Ricardo Rhenals Garrido<sup>1</sup>, Zbigniew Pokryszka<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INERIS, Verneuil-en-Halatte

Oil and gas production from shale formations stimulated by hydraulic fracturing (or « fracking ») is an abundant source of domestically available energy for the United States of America.

Today, shale formations are mostly fracked using fresh water or brine which induces large volumes of water to manage. Industry face issues related to containment, transport, recycling, reuse, treatment and disposal of wastewaters (wastewaters are defined as mixture of drilling fluids, hydraulic fracturing fluids and formation water). Some alternative fracking options are proposed by oil and gas companies to reduce the quantity of water that is used. Among these options, fracking with carbon dioxide appears to have several benefits compare to hydraulic fracking, as (1) it does not require water but carbon dioxide ; as (2) injection of carbon dioxide could enhance the gas recovery ; and as (3) carbon dioxide could be adsorb onto the shale surface to be permanently stored in the formation. Here, we will present and discuss our results from laboratory experiments in order to assess adsorption capacities of carbon dioxide onto shales.

Adsorptions experiments were carried out using a gravimetric sorption system based on magnetic suspension balance, which measures under controlled pressure and temperature conditions the changes in mass which act on solid samples during gas adsorption process.

Results will be presented as adsorption isotherms giving sorption capacities at different values of pressure for a given temperature. We will see that our experimental results can also be easily fitted to model adsorption processes in numerical codes.

Beyond the assessment of the carbon dioxide adsorption capacities, other topics should be discussed in further details as : What could be the impacts of changes in shale nanoporous structure through CO<sub>2</sub>/water/rock interactions on gas adsorption and recovery ? Is there any competitive adsorption between carbon dioxide and methane onto

shale as it is the case of gas adsorption onto coal? How can we model replacement of adsorbed methane by adsorbed carbon dioxide onto shale? Future studies will help to answer these questions, but we will give here first answers through our present experimental data.

## 7.2 Hydrogène souterrain : stockage et production naturelle (SFMC)

### Responsables :

- Michel Panfilov (Université de Lorraine, Nancy)  
mikhail.panfilov@univ-lorraine.fr
- Valérie Beaumont (IFPEN)  
valerie.beaumont@ifpen.fr

### Résumé :

Cette session présentera deux sujets liés à l'hydrogène souterrain en tant que vecteur ou source d'énergie renouvelable, qui sont apparus au premier plan des géosciences durant les dernières années : le stockage souterrain de l'hydrogène et les émanations naturelles d'H<sub>2</sub>. Le stockage souterrain d'H<sub>2</sub> est une solution reconnue être une des plus efficaces pour stocker l'électricité renouvelable excédentaire, dont la production est en augmentation en Europe et qui est souvent par nature intermittente. L'électricité produite est convertie en hydrogène « vert » par électrolyse de l'eau et est stockée dans un aquifère, une cavité saline, ou un gisement de gaz déplété. Une fois extrait d'un tel stockage, l'hydrogène est reconverti en électricité dans des piles à combustible ou par des turbines à gaz. Une autre application de l'hydrogène, cette fois produit dans des réacteurs nucléaires par des réactions thermo-chimiques, ou à partir de combustibles fossiles, pourrait également exiger des solutions de stockage afin de libérer la production de la demande des consommateurs, assurer une flexibilité au marché d'énergie, et de limiter l'impact environnemental. Les problématiques scientifiques liées au stockage souterrain d'H<sub>2</sub> sont significativement différentes de celles du gaz naturel ou de CO<sub>2</sub>. La grande mobilité des petites molécules d'H<sub>2</sub> et la forte réactivité avec d'autres espèces dissoutes dans le gaz ou l'eau en présence de bactéries déterminent la dominance de l'aspect transport réactif et microbiologie-chimie dans le comportement d'un stockage souterrain d'H<sub>2</sub>. Les problèmes essentiels concernent les fuites d'H<sub>2</sub> par diffusion, l'étalement latéral le long de la couverture du réservoir, les différentes formes de piégeage hydrodynamique, les pertes causées par les réactions biotiques initiées par plusieurs types de colonies méthanogènes, acétogènes, sulfato-réductrices et ferro-réductrices. La cinétique des réactions et de la croissance de populations de microorganismes font actuellement l'objet d'étude. Plusieurs données in-situ montrent un effet de séparation naturelle des composants chimiques dans le gaz stocké et l'apparition des zones sursaturées en hydrogène ou en méthane (phénomènes d'auto-organisation). L'importance du sujet est souligné par le fait qu'un projet Européen et plusieurs projets Allemands et Français sur cette thématique ont été lancés en 2012-2013.

La deuxième partie de la session est consacrée à l'étude des émanations naturelles d'hydrogène. La perspective est de considérer l'hydrogène non plus comme un vecteur d'énergie mais comme une source d'énergie propre, voire durable, sa combustion n'émettant que de l'eau. La genèse d'hydrogène naturel survient dans différents contextes géologiques, les dorsales médio-océaniques constituant les sites les plus connus, les premières émanations d'hydrogène naturel ou natif ayant été lors des campagnes d'exploration sous-marine. Toutefois, d'autres sources d'H<sub>2</sub> naturel existent, notamment des sources terrestres observées dans les massifs de péridotite, où le contexte tectonique particulier expose les roches mantelliques, à l'altération par les eaux météoriques. Mais encore, des zones situées au cœur des continents, où des aquifères

enrichis en hydrogène ont été mis en évidence, en particulier dans les parties les plus anciennes, les cratons précambriens. Des travaux récents ont confirmé l'existence de flux localement importants d'H<sub>2</sub> dans ces zones intraplaques. L'existence de tels flux suggère une production continue, les aquifères pouvant constituer des réservoirs transitoires. A l'origine de cet hydrogène naturel, 4 grandes familles de processus sont répertoriées : l'hydrolyse de l'eau, la décomposition de la matière organique, le métamorphisme ou encore le dégazage de la planète. L'hydrolyse naturelle de l'eau reste cependant le processus le plus étudié.

La genèse d'hydrogène naturel pourra être abordée dans cette session tant du point de vue de l'observation de terrain, de l'étude expérimentale que de la modélisation des processus mis en jeu.

### 7.2.1 (o) Key issues related to underground storage of natural gas with added hydrogen

Viktor Reitenbach<sup>1</sup>, Leonhard Ganzer<sup>1</sup>, Daniel Albrecht<sup>1</sup>, Birger Hagemann<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Petroleum Engineering, Clausthal University of Technology, Clausthal-Zellerfeld, Allemagne*

In a growing economy of renewable energies the existing infrastructure of the natural gas transportation pipeline network and underground gas storage (UGS) facilities in Germany provide opportunity and large capacities to feed, transport and store hydrogen and synthetic fuel gases containing hydrogen, produced from the renewable sources. These gases when fed into the natural gas transportation system will increase the hydrogen content of the transported natural gas, which eventually will also reach underground gas storage facilities. At low hydrogen concentrations only minor changes to gas transportation equipment will be required. However, the limited knowledge on the influence of the added hydrogen on the porous reservoir rocks and the equipment of the underground gas storages cannot be deemed to be adequate.

UGS designed in converted gas fields and aquifers are particularly susceptible to the effect of hydrogen. Key issues addressed in this paper are the capacity and energy efficiency of such underground gas storages, the geological integrity of the reservoir and caprocks, the technical integrity of gas storage wells, durability of the materials used for well completions, corrosion and environmental risks associated with the products of microbial metabolism.

From the study conducted by the authors it can be conclusively stated that in particular cases the downhole equipment of the underground storage of natural gas with added hydrogen should be adapted to the new hydrogenous environment. Here, the high hydrogen diffusivity poses a risk of hydrogen-induced corrosion and imposes special requirements on the materials used. The hydrodynamic behavior of the storage complex and the sealing capacity of the caprock could also be altered due to the hydrogen content of the natural gas. In addition, microbiological activity provides a particular risk for durability of the downhole equipment and technical integrity of the storage wells and UGS surface facility.

### 7.2.2 (o) Kinetic model with memory for biochemical reactions in underground hydrogen storage

Birger Hagemann<sup>1,2</sup>, Mojdeh Rasoulzadeh<sup>2</sup>, Michel Panfilov<sup>2</sup>, Leonhard Ganzer<sup>1</sup>, Viktor Reitenbach<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Petroleum Engineering, Clausthal University of Technology, Clausthal-Zellerfeld, Allemagne*  
<sup>2</sup>*LEMTA, Nancy*

Underground hydrogen storage (UHS) is the form of storing electricity with the objective to equilibrate the regular energy consumption and the intermittent electricity production (by windmills or solar). In geological strata hydrogen is used by several types of microorganisms for the metabolism, which represents the main difficulty of this technology. Consequently, a UHS behaves as a biochemical reactor with major alteration in the composition of the stored gas. Such a behavior was confirmed in practice in Lobodice town gas storage (Czech) and Beynes (France). The fundamental problem in modeling of such systems is the kinetics of bacterial population growth and the rate of biochemical hydrogenotrophic reactions.

Several classes of microorganisms use hydrogen : methanogenic or acetogenic archaea, sulfate-reducing and iron-reducing bacteria catalyze the reactions of hydrogen with other components dissolved in water or present in rocks. The experimental data for these reactions observed in

batch culture show several standard phases in population dynamics : the lag, the exponential growth, the stationary phase and the decay. The main problem represents the lag and the stationary phase, which are caused by a delay in bacterium reaction on a sharp external perturbation. In the present paper a model with memory is developed for the microbial kinetics, which describes all phases observed in experiments. It takes into account the fact that the influence of any perturbation decreases in time. To close this model, we used the experimental data to determine the memory kernel of the memory operator. The closed model was used next in numerical modeling of hydrogen-water transports in underground hydrogen storage. We compared our results with classical models and revealed significant differences in some cases.

For simulations, the models of microbial growth and microbial kinetics were implemented into DuMux that is an open source simulator for flow and transport in porous media. This allows the simulation of the multi-component two-phase transport coupled with population dynamics and with biochemical reactions. A case study was performed to investigate the behavior around an injection well and related to this the influence of the characteristic parameters of the microbial growth and decay model was analyzed.

### 7.2.3 (o) Impact de l'activité bactérienne sur le stockage souterrain d'hydrogène

Fabrice Golfier<sup>1</sup>, Anozie Ebigbo<sup>2</sup>, Michel Quintard<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Laboratoire GéoRessources, Nancy*  
<sup>2</sup>*RWTH Aachen University, Aachen, Allemagne*  
<sup>3</sup>*IMFT, Toulouse*

A l'heure actuelle, le stockage géologique (cavité saline, champs d'hydrocarbures déplétés ou nappes aquifères) est probablement la technologie la plus prometteuse pour stocker de grandes quantités d'hydrogène à moindre coût ce qui permettrait à moyen terme d'atteindre un seuil de rentabilité économique. Dans ce but, il est nécessaire de mieux connaître et de mieux contraindre les phénomènes qui pourraient altérer la ressource stockée en quantité et en qualité. Un point clé spécifique au stockage souterrain de H<sub>2</sub> réside dans la capacité de certaines populations bactériennes à dégrader une partie du gaz présent au travers de différentes réactions métaboliques tels que méthanogénèse, sulfato-réduction, ferri-réduction.... Ces bactéries qui se développent sous forme de colonies (biofilms) au sein des zones de saturation résiduelle en eau participent de manière hétérogène au processus de transformation de l'hydrogène tout en interagissant avec les autres populations microbiennes (compétition/prédation) et le milieu géologique ce qui conduit à une dynamique complexe à l'échelle du réservoir.

Un modèle hybride à l'échelle du pore simulant l'activité bactérienne et le transport des espèces chimiques associées a été développé afin d'étudier ces aspects [1]. Celui-ci associe une description microscopique du transport diffusif et réactif des espèces chimiques dissoutes et de la croissance bactérienne (modèle de croissance de type Volume Of Fluids) à une description de l'écoulement et du transport par convection et diffusion au sein de la phase gazeuse. Les interactions entre bactéries méthanogènes, acétogènes et acétotrophes sont ici considérées. Des résultats seront présentés afin d'illustrer les processus de compétition inter-bactériens mis en jeu ainsi que l'impact sur la ressource en gaz stocké. A terme, ce modèle devrait permettre de dimensionner de futurs travaux en laboratoire et de faire une première analyse de sensibilité des modèles aux différents paramètres susceptibles de contrôler les perturbations induites par un stockage géologique d'H<sub>2</sub>.

[1] Ebigbo, A., Golfier, F. and Quintard, M. 2013, A coupled, pore-scale model for methanogenic microbial activity in underground hydrogen storage, *Adv. Water Resour.*, 61, 74-85.

### 7.2.4 (o) Self-organization phenomena in underground methanation systems, hydrogen storages and natural hydrogen reservoirs

Michel Panfilov<sup>1</sup>, Amankeldy Toleukhanov<sup>2</sup>, Mojdeh Rasoulzadeh<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LEMMA, Nancy

<sup>2</sup>Al Farabi Kazakh National University, Kazakhstan

Underground hydrogen occurs in three cases : (i) in underground storage of pure hydrogen, which is the storage of excessively produced electricity converted to hydrogen, (ii) in underground methanation system, which represents the storages of hydrogen and carbon dioxide mixture with the objective to convert it into methane, (iii) in hydrogen reservoirs created by the nature. In all cases, the hydrogen is present in the mixture with water and other gases as carbon dioxide initially dissolved in water or injected with hydrogen. In geological strata these two gases are consumed by several types of bacteria for their metabolism. The model of gas-water transport with bacterial activity represents a nonlinear dynamic system, which can have non-trivial scenarios of evolution, as the appearance of self-organization. In the present paper the mathematical analysis of all probable scenarios is presented, which predicts the appearance of regular oscillations similar to Volterra-Lotka, or self-oscillations and limit cycles after passing through Turing's instability, or strange attractors and chaos, depending on the kinetics of bio-reactions. The same analysis is performed for the case when the effects of chemotaxis are significant. This analysis is completed with 2D and 3D numerical simulations of the behavior of an underground methanation system in aquifer and depleted natural gas reservoir.

### 7.2.5 (o) Geochemical reactivity and migration of pure hydrogen through sandstone : Application to geological storage

Alireza E. Yekta<sup>1</sup>, Johan Villeneuve<sup>1</sup>, Pascal Audigane<sup>2</sup>, Michel Pichavant<sup>1</sup>, Bruno Scaillet<sup>1</sup>, Claret Francis<sup>2</sup>, Jean-Charles Manceau<sup>2</sup>, Catherine Lerouge<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

The objective to integrate renewable energy in the global market (mainly solar and wind) induces the need to develop storage technology to obtain alternative availability for later use when electricity demand is surpassing electricity generation. Large bulk storage, such as hydrogen storage, is currently at a very early stage of development. The storage of large quantities of hydrogen underground is a key step for the hydrogen economy.

Being composed of small molecules, hydrogen has a strong ability of migrate in porous medium and can also be highly reactive with the rock minerals. These reactions are observable in the metamorphic context under high temperature and pressure (eg, serpentinization). In order to study the migration of hydrogen through the rocks, the role of various chemical reactions should be considered. In the context of underground storage for electric energy, lower temperature and pressure are envisaged (50°C-100°C at 100 bar) and solubility, diffusion, and fluid rock interactions have to be evaluated. In the case of storage in sedimentary rocks such as sandstone, changes of the porous structure of the rock are expected and may influence the storage properties.

Specific laboratory experimental benches are being developed (1) to measure the transport properties of gaseous H<sub>2</sub> into porous sandstone and (2) to determine the consequences of the introduction of gaseous hydrogen on fluid-rock interactions. The experiments use several types of sandstone samples from the Vosges as starting materials. Their mineralogical and petrophysical characterization is currently in progress.

Results of the sandstone-hydrogen interaction experiments will be presented.

The experimental results will be integrated in numerical simulations to model the fluid-rock chemical interactions and the physical migration of hydrogen into sandstone reservoirs. Such studies will help evaluating the potential of sandstone rocks in terms of hydrogen storage under underground conditions.

### 7.2.6 (o) Is hydrogen chemically inert at low temperature in the absence of bio-mediators ?

Laurent Truche<sup>1</sup>, Gilles Berger<sup>2</sup>, Achim Albrecht<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GeoRessources, Université de Lorraine, Vandoeuvre-Lès-Nancy

<sup>2</sup>IRAP, Toulouse

<sup>3</sup>ANDRA, Châtenay-Malabry

Redox reactions induced by hydrogen are of prior importance in numerous fields of investigation in the Earth Sciences where hydrogen is either naturally produced (serpentinization) or supplied directly or indirectly in various geological formations by industrial activities (nuclear waste storage, underground hydrogen storage). Hydrogen chemical reactivity, being restricted to redox reactions, is known to be kinetically limited, likely because of the apolar nature of the molecule and the strong H-H binding energy (436 kJ/mol) that requires the overstepping of a high energetic barrier before an eventual electronic transfer can take place. Thus, most of the possible redox reactions induced by hydrogen remain insignificant at low temperature, even on a geological time scale, provided that no catalyst (bacteria, mineral surfaces, engineered materials) is present. This is typically the case for sulphate and carbonate reduction. For example, the half-life for sulphate in an abiotic SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/H<sub>2</sub> system at 90 °C exceeds 200,000 years ; this is in the same order of magnitude of the carbonate half-life in a similar system estimated to about 160,000 years at 100 °C.

However, and despite the above-mentioned limitations, some H<sub>2</sub>-induced redox reactions may be significant at low temperatures. In particular, pyrite (FeS<sub>2</sub>), even if present at a few percent in the host rock, is a potential oxidant for hydrogen, because this mineral can be reduced to pyrrhotite (FeS<sub>1+x</sub>) under medium-hydrothermal condition [1]. Abiotic nitrate reduction into ammonium induced by hydrogen represents also a major reaction of interest in the context of disposal of nuclear waste and for the origin of life in sub seafloor hydrothermal systems. This reaction is catalysed by the presence of magnetite, Ni-Fe alloys or stainless steel [2].

We review all these thermodynamically feasible reactions in the presence of H<sub>2</sub>, and we discuss their importance in different natural and industrial context given their kinetics and mechanisms.

[1] Truche et al. (2013a). Chem. Geol. 351, 217-228.

[2] Truche et al. (2013b). Applied Geochem., 35, 279-288.

### 7.2.7 (o) Evidences for natural molecular hydrogen seepages associated with rounded subsident structures in intraplate continental context

Eric Deville<sup>1</sup>, Nikolay Larin<sup>2</sup>, Viacheslav Zgonnik<sup>1</sup>,  
 Valérie Beaumont<sup>1</sup>, Kathleen Farrell<sup>3</sup>, Alain Prinzhofer<sup>4</sup>

<sup>1</sup>IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison

<sup>2</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth, Moscow, Russie

<sup>3</sup>USGS North Carolina, Raleigh, NC, États-Unis

<sup>4</sup>IFP Energies nouvelles, Present adress : IPEXCO, Botafogo, Rio de Janeiro, Brésil

Molecular hydrogen anomalies have been discovered in soil gases in or around rounded/oval structures of European Russia and of the Eastern coast of the United States. This type of structures is widespread from the Moscow region to Kazakhstan and all over the Atlantic coastal plains of the United States. Notably in north and south Carolina they are commonly named Carolina Bays and the origin of these depressions is still debated. The size of these structures ranges from a hundred meters to several kilometers in diameter. Some of these structures are recent (less than 15 years). Molecular hydrogen at substantial concentration levels in the soil of these structures was detected using different types of field detectors and confirmed by GC analyses. The hydrogen concentrations are variable. Inside and around of these structures, concentration of molecular hydrogen in soil was much higher than outside, reaching locally more than 1.25% at 1.2 m depth. Such concentrations in a soil are high enough to be considered as issued from a perennial source. Hydrogen is commonly associated with small quantity of methane. We estimated a daily hydrogen flow seeping out from the soil toward the atmosphere to be higher than 20000 m<sup>3</sup> in some of these structures. We suggest that these H<sub>2</sub>-seeping rounded structures are the result of local collapses due to rock alteration along deep pathways of fluid flows containing hydrogen. The different possible origins of molecular hydrogen in subsurface in these continental contexts will be discussed.

### 7.2.8 (o) Caractérisation des émanations d'hydrogène naturel intracratonique : étude d'un système gaz/eau/roche au Kansas

Julia Guélard<sup>1</sup>, Valerie Beaumont<sup>1</sup>, Eric Deville<sup>1</sup>, François Guyot<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison - France

<sup>2</sup>IMPMC, Paris

<sup>3</sup>IPG Paris

Des émanations d'hydrogène naturel sont décrites à proximité des dorsales médio océanique(1) et au sein des ceintures ophiolitiques(2,3,4). Cette production naturelle de gaz, telle que documentée, est étroitement liée au métasomatisme de roches ultrabasiques d'origine mantellique à travers les réactions de serpentinisation. Dans le cadre de la recherche de nouvelles sources d'énergie propres et durables, nous étudions les mécanismes de formation de l'hydrogène dans un contexte géologique différent : les environnements intra-cratoniques.

Des études antérieures(5,6) font état de puits riches en H<sub>2</sub> au Kansas. Plusieurs hypothèses sur l'origine de ce gaz ont été suggérées(5), mettant notamment en avant un processus associé à la présence de roches basiques et ultrabasiques au sein du système du rift central nord-américain.

Nos travaux s'appuient sur des forages existants, principalement sur le puits de Duroche (Kansas, USA) qui nous permet d'accéder à un aquifère modérément profond (500 m) chargé en hydrogène dissous. Cet hydrogène est associé à de l'azote et du méthane tout comme l'hydrogène issus des contextes ophiolitique, de surcroît une concentration importante d'hélium est identifiée et l'eau associée présente des propriétés physico-chimiques singulières.

Afin de comprendre l'origine de la composante gaz de l'aquifère (dont l'hydrogène), évaluer la dynamique de recharge, et dimensionner les réserves, une étude multidisciplinaire gaz/eau/roche est réalisée.

Suite à deux missions d'échantillonnage sur le puits de Duroche en novembre 2013 et mai 2014, nous vous présenterons les premiers résultats et interprétations de la composition des fluides ainsi que le contexte géologique régional.

(1)Charlou et al. (2002). Chem. Geol., 191, 345-359.

(2)Sano et al. (1993). Appl. Geochem., 8, 1-8.

(3)Hosgormez et al.(2008). Geofluids, 8, 263-273.

(4)Abrajano et al. (2009). Appl. Geoch., 5, 625-630.

(5)Coveney et al. (1987). AAPG Bull., 71, 39-48.

(6)Newell et al. (2007) Nat. Res. R., 16, 277-292.

### 7.2.9 (o) Unconventional generation of hydrocarbon gases in petroleum basin : The role of siderite

Vincent Milesi<sup>1</sup>, Alain Prinzhofer<sup>2</sup>, François Guyot<sup>1,3</sup>, Fabrice Brunet<sup>4</sup>, Laurent Richard<sup>5</sup>, Nadir Recham<sup>6</sup>, Julien Dairou<sup>7</sup>, Marc Benedetti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>IPEXCo, Botafogo, Rio de Janeiro - Brésil

<sup>3</sup>IMPMC, Paris

<sup>4</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>5</sup>Geoquímics dels Àngels, Barcelona, Espagne

<sup>6</sup>Laboratoire réactivité et chimie des solides, Amiens

<sup>7</sup>Unité de Biologie Fonctionnelle et Adaptative, Paris

Several gas accumulations in the Solimões sedimentary basin (north-western Brazil) present methane with elevated  $\delta^{13}\text{C}$  values and reversals in C1-C4 carbon isotopic patterns. RockEval analyses of source rock cuttings showed siderite FeCO<sub>3</sub> content up to 7% by weight. The siderite proportions decrease with the increase of thermal stress and gas maturity, while total iron contents remain constant. In the Solimões basin, triassic diabase intrusions induced an overheating of the source rock which may have induced that destabilization of siderite. In order to understand these observations, laboratory experiments were conducted between siderite and water in gold containers at 200-300°C and 500 bars, yielding mostly magnetite, poorly crystallized graphite, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, formic acid and CH<sub>4</sub>. Thermodynamic calculations indicate that CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> are close to equilibrium with siderite, magnetite and graphite and that CH<sub>4</sub> can be produced by reduction of CO<sub>2</sub>. In the Solimões samples, scanning and transmission electron microscopies showed the coexistence of magnetite with Mg-Fe phyllosilicate in samples with low siderite contents suggesting destabilization of siderite both to magnetite and to this phyllosilicate. This additional complexity does not qualitatively modify the resulting model : CH<sub>4</sub> produced from the CO<sub>2</sub> reduction by siderite-generated H<sub>2</sub> is consistent with the heavy  $\delta^{13}\text{C}$  of methane and with the positive correlation between siderite destabilization and gas maturity. Hydrogenation of highly mature kerogen could have also participated to the production of <sup>13</sup>C-rich CH<sub>4</sub> and could explain the observed C1-C4 isotopic pattern. Simple mass balance calculations indicate that the water reduction to H<sub>2</sub> due to siderite destabilization may be at the origin of half of the CH<sub>4</sub> accumulated in the Solimões basin.

### 7.2.10 (o) Hydrogen production and the serpentinisation of terrestrial peridotites

Valerie Beaumont<sup>1</sup>, Eric Deville<sup>1</sup>, Christèle Vacquand<sup>1</sup>, F. Guyot<sup>2,3</sup>, Alain Prinzhofer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison

<sup>2</sup>IMPMC, Paris

<sup>3</sup>IPG Paris

Serpentinisation is the main process reported to produce H<sub>2</sub> on Earth's surface environment. Inherent to the exposure of reduced mantle rocks to surface oxidant conditions, it occurs quantitatively at mid-oceanic ridges (MOR) where hydrothermal fluid circulation at high temperature (around 300°C) provides optimal conditions for ferromagnesian mineral alteration and hydrogen production during serpentinisation (McCollom & Bach, 2009). Meanwhile, hydrogen and methane gas seepages

associated with ultrabasic rock exposure to terrestrial surface conditions are reported in the peridotite massifs of the Sultanate of Oman (Neal & Stanger, 1983), the Philippines (Abrajano et al., 1988) and Turkey (Etiopie, et al., 2011). Optimal conditions for hydrogen production are not encountered in this terrestrial environment, when compared to MOR, although substantial gas flows are observed. These gas seepages are usually associated to hyperalkaline water springs, which are reported in most ultrabasic rock exposures on continents (Barnes, et al., 1967; Bruni, et al., 2002), and interpreted as evidences of active serpentinisation. Herein we investigate gases from different peridotite massifs worldwide and report the first study of such gases in New Caledonia and Ligurian Alps. Based on a geochemical approach including chemical compositions, stable isotopes of carbon and hydrogen together with noble gas compositions, we propose new elements to understand the origin and genesis of these gases. Notably, hydrogen produced in these environments is associated to methane and dinitrogen. Different proportions of these 3 major gaseous compounds according to geological contexts are observed. The study focuses not only on understanding gas/water/rock interactions but also on deciphering the interactions between gaseous compounds.

#### REFERENCES

- Abrajano, et al. (1988). *Chem. Geol.*, 71, 211 ?222.  
 Barnes, et al. (1967). *Science*, 156, 830 ?832.  
 Bruni, et al. (2002). *Appl. Geochem.*, 17, 455 ?474.  
 Etiopie, et al. (2011). *EPSL*, 310, 96 ?104.  
 McCollom & Bach. (2009). *GCA*, 73, 856 ?875.  
 Neal & Stanger. (1983). *EPSL*, 66, 315 ?320.

### 7.2.11 (o) Production d'hydrogène dans les systèmes hydrothermaux hyperalkalins des ophiolites (Oman, Ligurie, Nouvelle Calédonie)

Christophe Monnin<sup>1</sup>, Valérie Chavagnac<sup>1</sup>, Cédric Boulart<sup>2</sup>, Georges Ceuleneer<sup>1</sup>, Guilhem Hoareau<sup>3</sup>, Bénédicte Ménez<sup>4</sup>, Emmanuelle Gérard<sup>4</sup>, Martine Gérard<sup>5</sup>, Marianne Quéméneur<sup>6</sup>, Gael Erauso<sup>6</sup>, Anne Postec<sup>6</sup>, Linda Guentas-Dombrowski<sup>7</sup>, Claude Payri<sup>8</sup>, Bernard Pelletier<sup>8</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Laboratoire Géochimie et Métallogénie, Plouzané

<sup>3</sup>LFC-R, Pau

<sup>4</sup>IPG Paris

<sup>5</sup>IMPMC, Paris

<sup>6</sup>Institut méditerranéen d'océanologie, Marseille

<sup>7</sup>Matériaux Polymères Interfaces Environnement Marin, La Garde

<sup>8</sup>Centre IRD de Nouméa, Nouvelle-Calédonie

La serpentinisation des peridotites est un processus complexe mettant en jeu simultanément des réactions de dissolution des minéraux primaires (olivines, pyroxènes), de formation de minéraux secondaires (serpentes, brucite, magnétite) et des réactions d'oxydo-réduction (oxydation du fer et réduction de l'eau). Des campagnes de terrain dans les massifs ultrabasiques émergés comme les sections mantelliques des ophiolites d'Oman, de Ligurie (Italie du Nord) et de la Baie de Prony (Nouvelle Calédonie) nous ont permis d'échantillonner des eaux de sources chaudes (40°C) présentant des pH jusqu'à 12,2. Les gaz bullant dans ces sources sont dominés par l'azote, mais sont enrichis en hydrogène (jusqu'à 25%) et en méthane (30%), avec une composition pouvant varier en fonction du contexte lithologique. Le mélange entre les eaux du pôle hydrothermal, de type Ca-OH, et les eaux locales (le ruissèlement continental en Oman et Ligurie et l'eau de mer du lagon dans la baie de Prony), riches en Mg et CO<sub>3</sub>, conduit à la formation d'un assemblage de brucite et de carbonates de Ca et Mg, similaire à ce qui a été décrit à Lost

City. En baie de Prony on observe aussi la formation de carbonates de Mg et Ca sur des substrats filamenteux d'origine organique (organominéralisation). Ces minéralisations conduisent à la formation de travertins (Oman) ou de structures de type aiguille sous-marine pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres de haut en Baie de Prony. Il a été identifié dans les conduits des concrétions et les fluides de la Baie de Prony des communautés de microorganismes chimolithotrophes (bactéries et archées) qui participent à la production et consommation d'hydrogène et de méthane. De plus une compilation des données de potentiel redox mesuré dans ces sources hyperalkalines montre que ces eaux sont les plus réductrices au monde et que le champ de stabilité de l'hydrogène peut y être atteint.

L'observation de ces systèmes eaux-gaz-minéraux-microorganismes à l'interface minéral-vivant pose donc la question du mécanisme de la production naturelle d'hydrogène dans l'hydrothermalisme hyperalkalin de basse température.

### 7.2.12 (o) Quantification expérimentale de la production d'H<sub>2</sub> au cours de la réaction de serpentinisation

Colin Fauguerolles<sup>1</sup>, Teddy Castelain<sup>1</sup>, Johan Villeneuve<sup>1</sup>, Michel Pichavant<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

Afin de quantifier la production d'H<sub>2</sub> associée à la serpentinisation et d'en contraindre la cinétique, des expériences d'altérations hydrothermales ont été réalisées. Les produits de départ sont une harzburgite du Pinde broyée et de l'eau de mer artificielle (3,2 pds% NaCl). Deux granulométries, chacune <60µm, sont utilisées (pwd1 et pwd2). Le rapport eau-roche est de ~1,8 (40g de roche et 72g d'eau). Les expériences sont réalisées à 250, 300 et 350°C et à 500bar. Pour chaque température, deux expériences sont conduites en parallèle. Dans la première, le fluide hydrothermal est échantillonné périodiquement et sa concentration en H<sub>2</sub> ([H<sub>2</sub>]) déterminée par chromatographie en phase gazeuse (GC). Dans la seconde, une membrane en Au<sub>20</sub>Pd<sub>80</sub> semi-perméable à l'H<sub>2</sub> placée directement dans la cellule réactionnelle mesure en continu la fugacité d'H<sub>2</sub> (fH<sub>2</sub>).

[H<sub>2</sub>] est maximale à 300°C avec un plateau à ~115mmol/KgEau contre ~50mmol/KgEau à 250°C (à durée égale, l'expérience à 350°C (en cours) montre des [H<sub>2</sub>] ~10 fois inférieures). La cinétique de production d'H<sub>2</sub> est contrôlée par la granulométrie. A 300°C, le plateau de [H<sub>2</sub>] est atteint en ~35jrs pour pwd2 contre ~55jrs pour pwd1. A 250 et 300°C, l'augmentation de la fH<sub>2</sub> est visible dès le 2ème jour et atteint une vitesse maximale au 4ème jour. A 300°C, la fH<sub>2</sub> se stabilise au bout de ~40jrs à 23bar (fO<sub>2</sub> ≈ NNO - 4,1-4,3). A 250°C, il faut attendre ~70jrs pour atteindre une fH<sub>2</sub> de 38bar (fO<sub>2</sub> ≈ NNO - 4,6-5,1). Les produits solides, récupérés et analysés en fin d'expérience, se caractérisent par des taux de serpentinisation >80% et contiennent des quantités variables de magnétite et de brucite.

Afin de lier fH<sub>2</sub> et [H<sub>2</sub>], des expériences couplant les deux types de mesures sont en cours dans le système H<sub>2</sub>O-H<sub>2</sub>. A 300°C, les premiers résultats montrent une relation fH<sub>2</sub> ≈ 395 × [H<sub>2</sub>]. Les évolutions opposées de fH<sub>2</sub> et de [H<sub>2</sub>] lorsque l'on passe de 300 à 250°C témoigneraient d'une variation de γH<sub>2</sub> à proximité du domaine diphasique.

### 7.2.13 (o) Etude expérimentale de l'évolution de la perméabilité des peridotites lors de la serpentinisation

Johan Villeneuve<sup>1</sup>, Colin Fauguerolles<sup>1</sup>, Teddy Castelain<sup>1</sup>, Michel Pichavant<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

Des fluides hydrothermaux enrichis en H<sub>2</sub> résultant de la serpentinisation de roches mantelliques ont été découverts récemment au niveau des dorsales océaniques lentes. Les mécanismes de production ainsi que le devenir de H<sub>2</sub> sont mal contraints. Un des paramètres clé pour notre compréhension du comportement de l'H<sub>2</sub> réside dans la connaissance de l'évolution de la perméabilité des péridotites au cours de leur serpentinisation progressive.

Le montage original utilisé pour ce projet permet l'enregistrement en continu d'un flux de fluide (eau de mer artificielle) percolant des échantillons de péridotites provenant de l'ophiolite de Pinde dans les conditions de pression et de température rencontrées au niveau des dorsales océaniques (500 bars, 200-400°C). L'enregistrement des flux d'eau de mer artificielle est fait à l'aide d'une pompe doseuse. La connaissance de la géométrie des échantillons (surface, longueur) et l'utilisation de la loi de Darcy permettent de calculer la perméabilité et ainsi de suivre son évolution lors de la serpentinisation.

Les résultats de ces expériences nous montrent que pour des températures de 250°C et 300°C, la serpentinisation des péridotites se traduit par une forte diminution de la perméabilité, jusqu'à 2 ordres de grandeur après 3 semaines, pour se stabiliser ensuite vers des valeurs  $\approx 10$ -20 m<sup>2</sup>. La cinétique réactionnelle de production de serpentine est rapide puisque l'essentiel de la chute de perméabilité est réalisée en 4-5 jours. L'analyse pétrographique et chimique des échantillons qui est actuellement en cours va permettre de caractériser les minéraux formés conduisant au colmatage des fractures de la roche. Ces expériences montrent qu'en milieu naturel (dorsale océanique lente), sans modification des contraintes tectoniques, cette chute de perméabilité impliquerait un arrêt rapide des possibilités de circulation des fluides et des réactions entre le fluide et les péridotites. L'H<sub>2</sub> produit dans ces conditions est susceptible de rester partiellement piégé dans les péridotites.

### 7.3 Monazite : un marqueur des processus crustaux. Avancées et développements récents (SFMC)

#### Responsables :

- Philippe Goncalves (Lab. Chrono-environnement, Besançon)  
philippe.goncalves@univ-fcomte.fr
- Anne-Magali Seydoux-Guillaume (GET, Toulouse)  
anne-magali.seydoux@get.obs-mip.fr
- Valérie Bosse (Lab. Magmas et volcans, Clermont)  
V.Bosse@opgc.univ-bpclermont.fr
- Emilie Janots (ISTerre, Grenoble)  
emilie.janots@ujf-grenoble.fr
- Marc Poujol (Géosciences Rennes)  
marc.poujol@univ-rennes1.fr

#### Résumé :

La monazite est un phosphate de Terres Rares pouvant incorporer par substitutions chimiques des quantités non négligeables d'actinides, tel que l'uranium et le thorium. Les observations naturelles et données expérimentales montrent que ce minéral est stable sur une large gamme de conditions P-T depuis la diagenèse jusqu'aux conditions métamorphiques de ultra-hautes températures et ultra-hautes pressions, et pour des compositions chimiques de roches et de fluides variées. Ainsi la monazite constitue un excellent traqueur des processus crustaux (sédimentaires, hydrothermaux, métamorphiques et magmatiques) pouvant être à l'origine de formation de gîtes et gisements de Terres Rares, Uranium et Thorium.

La monazite est aussi un géochronomètre largement utilisé depuis les années 90. Toutefois, les 10 à 15 dernières années ont été marquées par des avancées significatives sur la connaissance du comportement de ce chronomètre dans des contextes géodynamiques variés grâce entre autres :

- (1) aux développements de micro et nano-caractérisations physico-chimiques (microsonde électronique, microscopie électronique en transmission (TEM-FIB)) et aux datations in-situ (LA-ICPMS, SIMS)
- (2) à une meilleure intégration de la pétrogenèse des monazites et de leurs données géochronologiques dans l'histoire pression, température, déformation, fluide, composition enregistrée par les roches
- (3) à de nouvelles données expérimentales sur la solubilité de la monazite dans les fluides aqueux et silicatés et sur les mécanismes de remise à zéro des chronomètres U/Pb et Th/Pb
- (4) à l'intégration de la monazite dans les diagrammes de phases

Nous invitons la communauté des Sciences de la Terre et de la Matière à participer à cette session pour discuter des récents développements et avancées futures autour de la monazite. Cette session se veut la plus large possible et intégrera aussi bien des travaux basés sur des observations naturelles en contexte sédimentaire, magmatique ou métamorphique, que sur des travaux expérimentaux ou des développements analytiques de caractérisation et datation. Nous encourageons vivement les travaux intégrant le rôle de la monazite sur les ressources en U, Th et Terres Rares Légères.

### 7.3.1 *Keynote communication* : Standards de monazite

Amélie Didier<sup>1,2</sup>, Jean-Louis Paquette<sup>1</sup>, Valérie Bosse<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LMV, Clermont-Ferrand

<sup>2</sup>Institut des Sciences de la Terre, Université de Lausanne, Suisse

Les méthodes de datations ponctuelles sur monazite (LA-ICP-MS, sonde ionique) nécessitent l'utilisation de standards de mêmes compositions chimiques et structures cristallines que les inconnus à dater, afin de réduire le fractionnement isotopique dû aux effets de matrice. Malheureusement, les standards de monazite n'ont pas toujours une composition isotopique homogène. Les standards Moacyr (âge 208Pb/232Th : 504Ma ; Seydoux-Guillaume et al., 2002 ; Gasquet et al., 2010), Manangoutry (âge 208Pb/232Th : 555Ma ; Paquette et Tiepolo, 2007), C83-32 (âge 208Pb/232Th : 2681 Ma ; Corfu, 1988) font partis des plus utilisés et des mieux décrits. Ils présentent néanmoins des défauts non négligeables pour une utilisation en routine. Moacyr souffre d'un excès en 206Pb qui implique un vieillissement des âges 206Pb/238U tandis que les âges U-Pb de Manangoutry sont discordants. Le problème le plus significatif est la présence de Pb commun dans Moacyr. Ceci affecte particulièrement les âges U-Pb, et ce de manière aléatoire puisque la répartition du Pb commun est hétérogène à l'échelle du cristal. Ainsi, dans le cas de monazites précambriennes, les âges U-Pb présentent des dérives allant jusqu'à 2.6% par rapport à l'âge vrai (207Pb/206Pb). C83-32 s'avère homogène isotopiquement, concordant et non affecté par un excès de 206Pb. Son utilisation comme standard semble donc préférable. On notera que chaque laboratoire de géochronologie possède son propre standard dont la composition chimique ou isotopique n'a pas forcément été publiée ou alors dans des revues à faible lisibilité. Il est pourtant vital pour assurer la cohérence des mesures, que l'ensemble de la communauté utilise un même standard. L'idéal serait de pouvoir synthétiser une monazite artificielle de composition chimique et isotopique déterminée. Toutefois, cette entreprise s'avère difficile du fait de sa richesse en éléments radioactifs.

### 7.3.2 (o) Constraints on Alpine hydrothermalism and deformation from Th-Pb dating of cleft monazite (Western Alps)

Alexis Grand'homme<sup>1</sup>, Emilie Janots<sup>1</sup>, Anne-Magali Seydoux-Guillaume<sup>2</sup>, Valérie Bosse<sup>3</sup>, Roger De Ascençao Guedes<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>GET, Toulouse

<sup>3</sup>LMV, Clermont-Ferrand

<sup>4</sup>Le Règne Minéral, Saint-Julien-du-Pinet

This study provides new constraints on fluid circulation and deformation in the Western Alps, through the elementary and isotopic analyses of alpine cleft monazite (LA-ICP-MS and EPMA measurements). Alpine clefts are hydrothermal veins that formed during deformation under metamorphic conditions below the ductile/brittle transition ( $T < 450^{\circ}\text{C}$ ). The studied veins are filled by hydrothermal crystals of quartz, chlorite ( $\pm$  epidote), albite and accessory minerals (monazite, apatite, xenotime, anatase, rutile). In these veins, large monazite crystals up to few millimeters can precipitate.

Prior to dating, the cleft monazite composition was thoroughly studied to reveal potential zoning and bring constraints on the behavior of REE+Y, Th, U and Pb in hydrothermal systems and during fluid/rock interaction. Clefts monazite crystals are commonly zoned in composition and age, indicating for successive growth episodes that have been dated using in-situ isotopic techniques (LA-ICP-MS). Due to the low U concentrations (and possible 206Pb excess) in Alpine clefts,

208Pb/232Th ages (no common Pb correction) are presented here.

In the Internal Alpine domains (Briançonnais) Th-Pb dating yields ages at  $32.1 \pm 0.2$  Ma (Mesozoic cover, limit with Piedmont zone) and  $23.3 \pm 0.2$  Ma (Zone Houillère). The timing of cleft monazite precipitation is coeval with major deformation events well recorded by other chronometers (activity of the pennic front and thrusting of the Helvetic nappes).

In two External Crystalline Massifs (ECM, Belledonne and Mont-Blanc), eight veins have been dated ( $\sim 200$  measurements), giving Th-Pb ages that are distinguished in two distinct populations at 12.6 - 11.2 Ma and 8.6 - 6.3 Ma. Intragrain dating in different compositional domains can give different ages up to 1.5 Ma.

The cleft formation occurs in periods of increasing exhumation rates (zircon fission track data) in the ECM, suggesting for a prominent role of deformation on the Neogene exhumation of the western Alps.

### 7.3.3 (o) Solubilité de la monazite dans les liquides silicatés : implications géochronologiques et sur le transfert de l'uranium dans la croûte continentale

Philippe Goncalves<sup>1</sup>, Marieke Van Lichtervelde<sup>2</sup>, Pauline Jeanneret<sup>1</sup>, Pierre Trap<sup>1</sup>, Cyril Durand<sup>3</sup>, David Quirt<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Chrono-environnement, Besançon

<sup>2</sup>GET, Toulouse

<sup>3</sup>Géosystèmes, Lille

<sup>4</sup>AREVA Ressources Canada, Saskatchewan, Canada

Dans les méta-sédiments de haut grade et les magmas méta- à peralumineux qui en dérivent par fusion partielle, l'uranium et le thorium sont principalement portés par la monazite. Ainsi l'interprétation des données géochronologiques dérivées de ce géochronomètre nécessite de comprendre le comportement de la monazite lors du métamorphisme de haut-grade. De plus, au cours de la fusion partielle et/ou la cristallisation des magmas, le comportement de l'U et Th sera contrôlé par la solubilité de la monazite dans le liquide silicaté. Afin de modéliser le comportement de la monazite et les mécanismes de transfert de ces éléments au cours d'événements tectono-métamorphiques, nous avons entrepris de raffiner les données expérimentales existantes sur la solubilité de la monazite en utilisant des magmas peralumineux ( $D \leq 1$ ) et des monazites synthétiques (pôles purs et solution solide). Les équations de solubilité sont intégrées dans des modèles thermodynamiques de type pseudosection, qui permettent de prédire la solubilité de la monazite pour toutes pressions et températures en fonction de la composition du protolithe et du liquide silicaté.

Les modèles thermodynamiques dérivés des données expérimentales de solubilité sont appliqués aux paragneiss migmatitiques de la zone de transition Mudjatik - Wollaston (Nord Saskatchewan, Canada). Il est ainsi possible de modéliser le long de trajets P-T l'évolution de la solubilité de la monazite dans les liquides silicatés et de déterminer les conditions P-T de dissolution et recristallisation de la monazite. Ces informations sont utilisées pour reconstruire des trajets P-T-t. Nous montrons aussi, qu'en système ouvert, l'extraction de liquide silicaté fait chuter significativement la solubilité de la monazite dans les magmas, ce qui induit un enrichissement passif dans les paragneiss restitiques. Ce phénomène pourrait expliquer, en partie, les très fortes proportions de monazite dans certains paragneiss alumineux de haut-grade.

### 7.3.4 (o) Cathodoluminescence et microanalyse électronique des phosphates de terres rares (monazite « grise » et xénotime) du Paléozoïque belge

Jean-Marc Baele<sup>1</sup>, Sophie Decrée<sup>2</sup>, Adrien Nelis<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Mons, Belgique

<sup>2</sup>Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bruxelles, Belgique

En Belgique, des phosphates de terres rares diagénétiques ont été décrits dans les terrains paléozoïques des massifs du Brabant et de l'Ardenne. Il s'agit classiquement des monazites « grises », d'abord identifiées dans les concentrés d'orpaillage, puis dans les pélites paléozoïques. L'utilisation de la cathodoluminescence permet de repérer rapidement ces phosphates, surtout par le biais de l'aurole d'irradiation qu'ils induisent dans le quartz environnant. Les observations effectuées jusqu'à présent montrent que ces phosphates seraient bien plus abondants que ne le suppose un examen pétrographique en polarisation et que le xénotime, qui accompagne presque systématiquement la monazite, peut dominer fortement l'assemblage des phosphates de terres rares. La distinction rapide entre ces deux phosphates est possible par leur émission totale de cathodoluminescence, qui est bleue pour la monazite et verte pour le xénotime. Cependant, cette émission est généralement faible, parfois trop faible pour être observée directement. L'imagerie spectrale de l'émission du néodyme permet alors de distinguer la monazite, qui est activée par Nd<sup>3+</sup>, du xénotime, qui ne l'est pas. Les nodules de monazite sont souvent zonés avec une luminescence qui augmente de l'intérieur vers l'extérieur. Des analyses réalisées à la microsonde électronique précisent la composition des monazites et des xénotimes. Elles confirment la composition particulière des monazites, comme leur richesse en europium (et en autres terres rares à moyennes Z) ainsi que leur pauvreté en thorium. Elles montrent également que la zonation observée en cathodoluminescence est due à un effet de « concentration quenching » du néodyme.

### 7.3.5 (o) Experimental hydrothermal alteration of monazite with alkali fluids, Implications for U-Th-Pb dating

Alexis Grandhomme<sup>1</sup>, Emilie Janots<sup>1</sup>, Anne-Magali Seydoux-Guillaume<sup>2</sup>, Damien Guillaume<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>GET, Toulouse

Monazite ([LREE, Th, U]PO<sub>4</sub>) is widely used in U-Th-Pb dating of magmatic and metamorphic rocks. Monazite frequently presents compositional and isotopic zoning. As solid state diffusion is very slow in monazite, the compositional domains correspond to successive crystallizations and/or replacement induced by dissolution-precipitation process during hydrothermal alteration, deformation or metamorphic reactions that release water. In nature, monazite recrystallized by replacement can incorporate significant amounts of Pb. Understanding the incorporation mechanisms of radiogenic or common Pb and the fractionation of REE, Th and U during recrystallization is essential for U-Th-Pb ages interpretation, particularly during fluid-related thermal events. In this study, we systematically investigate the redistribution of REE, U, Th and Pb during hydrothermal monazite replacement under alkali conditions (NaOH 1M), in presence of quartz. Experimentally, 50-100 μm monazite grains from the natural Manangotry monazite standard were introduced with high fluid/solid mass ratio (~5) in gold capsule and placed in cold-seal pressure vessel at 300, 400, 500 and 600°C, at pressure of 2 kbar and duration between 21 to 114 days. At 300°C, no textural change was observed. At higher temperature, from 400 to

600°C, BSE images of experimental products show typical replacement texture with pristine monazite surrounded by one alteration rim. Micrometric pores occur within both altered and unreacted domains. EPMA and LA-ICP-MS analyses show no chemical variations in unaltered monazite cores compared to the starting material. Altered domains are heterogeneous in compositions. Th and U contents decrease from 13 wt.% ThO<sub>2</sub> to 7-11 wt.%, and UO<sub>2</sub> from 0.2 wt.% to values ≤ 0.1 wt.%. Secondary monazite also presents REEs fractionation with increasing LREE/HREE ratios. In comparison to some previous experimental studies, altered zones in our samples contain various amounts (hundreds to thousands of ppm) of Pb and therefore U-Th-Pb system is incompletely reset. Pb in secondary monazite can be sequestered as (1) structural Pb, (2) Pb-rich nano-phases or (3) preservation of primary monazite relics.

### 7.3.6 Keynote communication : Age of cleft monazites in the eastern Tauern window : Constraints on crystallization conditions of hydrothermal monazite

Edwin Gnos<sup>1</sup>, Emilie Janots<sup>2</sup>, Alfons Berger<sup>3</sup>, Martin Whitehouse<sup>4</sup>, Franz Walter<sup>5</sup>, Thomas Pettke<sup>3</sup>, Christian Bergemann<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Natural History Museum of Geneva, Genève, Suisse

<sup>2</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>3</sup>Institut für Geologie, Bern, Suisse

<sup>4</sup>Swedish Museum of Natural History, Stockholm, Suède

<sup>5</sup>Institut für Erdwissenschaften, Karl Franzens-Universität, Graz, Autriche

<sup>6</sup>Earth and Environmental Sciences, University of Geneva, Suisse

Alpine clefts are tectonically formed cm- to meter-sized open fissures that become filled with hydrothermal fluid. Interaction of cleft-filling fluid with wall rock results in mineral dissolution/precipitation, alteration of the wall-rock, and repetitive crystallization of minerals on the cleft walls.

Ion probe Th-Pb and U-Pb dating of four cleft monazites from the Sonnblick region of the eastern Tauern Window, Austria, yields crystallization ages of different growth domains and aggregate regions ranging from 18.99 ± 0.51 Ma to 15.00 ± 0.51 Ma. The crystallization ages obtained in lithologies with equal Alpine metamorphic evolution are overlapping or slightly younger than zircon fission track ages but older than zircon (U-Th)/He cooling ages. This constrains cleft monazite crystallization in the area to 280°C - 200°C.

LA-ICP-MS data of dated hydrothermal monazites indicate that in graphite-bearing, reducing host lithologies, cleft monazite is poor in As and has higher La/Yb values and U concentrations, whereas in oxidized host rocks opposite trends are observed. Monazites show LREE enrichment with negative Eu anomalies and variable La/Yb values ranging from 520 to 6050. The positive correlation between Ca and Sr concentration indicates dissolution of plagioclase or carbonates as source of these elements. The analysed cleft monazites indicate that early exhumation and cleft formation in the Tauern is related to metamorphic dome formation caused by collision of the Adriatic indenter with the European plate. The obtained age data show that monazite crystallization in the Tauern metamorphic dome is slightly older than crystallization in the external Alpine massifs. Our data also demonstrate that hydrothermal monazite ages offer great potential to constraining the chronology of exhumation in collisional orogens.

### 7.3.7 (o) Th-Pb dating of hydrothermal cleft monazite in shear zones in the Grimsel area, Aar-massif (Switzerland)

Christian Bergemann<sup>1</sup>, Edwin Gnos<sup>2</sup>, Alfons Berger<sup>3</sup>, Martin Whitehouse<sup>4</sup>, Emilie Janots<sup>5</sup>, Thomas Pettke<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Earth and Environmental Sciences, University of Geneva, Suisse

<sup>2</sup>Natural History Museum of Geneva, Suisse

<sup>3</sup>Institut für Geologie, University of Bern, Suisse

<sup>4</sup>Swedish Museum of Natural History, Stockholm, Suède

<sup>5</sup>ISTerre, Grenoble

Three millimeter-sized hydrothermal monazites from open fissures (clefs) associated with different shear zones in the Grimsel area, Aar Massif, Switzerland, have been investigated using ion microprobe. Interaction of cleft-filling hydrothermal fluid with wall-rock results in REE mineral dissolution and alteration of the wall-rock. Redistribution of elements via a fluid over short distances (cm) led to formation of cleft monazite, which started to grow at the end of quartz crystallisation. Chemical zoning as revealed with BSE images indicates stepwise growth. Detailed structural mapping of the area was done by Roland et al. (2009) and Wehrens et al. (in prep). Shear zones in the study area are SW-NE oriented. One of the analyzed clefs is subhorizontally oriented and related to a vertical movements indicated by subvertical stretching-lineation. The two other clefs, vertically oriented, are part of strike slip movements.

High precision isotope dating yields monazite crystallization ages. Unlike 238U-206Pb ages, 232Th-208Pb hydrothermal monazite ages are not affected by excess Pb (Janots et al., 2012). The analysed monazites yield growth domain between 12 to 10 Ma and another group at 7 Ma. These monazite growth ages are interpreted as part of cleft forming processes due to local brittle deformation inside an overall ductile shear zone evolution. Subhorizontally and vertical clefs are within error of the same age. Our ages are in accordance with slightly older 40Ar-39Ar ages of 13.8-12.2 Ma of phengites in mylonites (Rolland et al., 2009) interpreted to constrain ductile deformation and may mark the transition to brittle deformation. Mylonite and fault gouge K-Ar ages of Kralik et al. (1992) of 11.7 to 6.4 Ma interpreted as recrystallization during continuous fault activity in a similar shear zone in tunnel outcrop confirm a reactivation visible in the younger monazite age group.

[1] Roland, Cox, & Corsini (2009) Struct. Geol. 31, 1377-1394. [2] Janots, Berger, Gnos, Whitehouse, Lewin & Pettke (2012) Chem. Geol. 326/327, 61-71. [3] Kralik, Clauer, Holnsteiner, Huemer & Kappel (1992) J. Geol. Soc. London 149, 293-301.

### 7.3.8 (o) Using monazite to constrain age of partial melting : implications for Southern Britany tectonic evolution

Romain Augier<sup>1</sup>, Flavien Choulet<sup>2</sup>, Michel Faure<sup>1</sup>, Paul Turillot<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>Chrono-Environnement, Besançon

By drastically reducing the global strength of crustal materials, partial-melting is one of the main parameter controlling the rheological behaviour of the continental crust. With large exposure of migmatites and granites, the coastal South Armorican Domain, offers an opportunity to study deep-orogenic processes and understand the role of partial-melting for the late-evolution of the Variscan belt. To date, time-constraints are scarce hindering the understanding of this crucial stage in the Variscan belt evolution. This paper provides 29 new chemical U-Th/Pb ages on monazite collected over five sampling areas consisting

in migmatite domes and either associated or late regional classic plutons. Based on structural, textural and chemical criteria, three main age-groups were distinguished. The first group, settled at ca. 335-330 Ma includes restites and core-domains of monazite crystals from the granite massifs. Its significance is ascribed to inherited crystallisation ages related to prograde monazite forming reactions during Early Carboniferous nappe-stacking. The second group at ca. 325-320 Ma corresponds to newly formed monazite grains that crystallised from juvenile silicate melts. Ages of this group are interpreted as crystallisation ages of the leucosomes due to partial-melting affecting the whole domain. The last ca. 320Ma group corresponds to rim-domains of monazite crystals. It is interpreted as the emplacement age of the large-scale granite massifs and therefore constrain the end of regional anatexis. The inception and drastic generalisation of partial-melting at peak-P conditions coincides with a major change in the tectonic regime recorded at regional-scale. This implies that (1) either continuous stacking of continental crustal units led to an increase of temperature within the orogenic wedge provoking partial melting, and resulting drop in the crustal strength facilitated collapse and lateral expansion of the belt, and/or (2) a drastic change of the boundary conditions has induced asthenospheric upwelling leading to coeval extension and partial melting. Besides, local strain benefited from the low-strength of the magmatic bodies to promote intense localisation of deformation within the South Armorican Domain large-scale laccoliths often referred to as synkinematic plutons.

### 7.3.9 (o) Évolution tectono-métamorphique pré-Athabasca de la zone de transition Wollaston-Mudjatik (Saskatchewan, CANADA) : implication sur les transferts de l'uranium

Pauline Jeanneret<sup>1</sup>, Philippe Goncalves<sup>1</sup>, Cyril Durand<sup>2</sup>, Pierre Trap<sup>1</sup>, Marc Poujol<sup>3</sup>, David Quirt<sup>4</sup>, Antonio Benedicto<sup>4</sup>, Didier Marquer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Chrono-environnement, Besançon

<sup>2</sup>Géosystèmes, Lille

<sup>3</sup>Géosciences Rennes

<sup>4</sup>Areva Ressources Canada, Saskatoon, Canada

Dans la partie Est du bassin de l'Athabasca (BA), les minéralisations uranifères (1.6-1.4 Ga) de type discordance sont localisées à l'aplomb de la zone de transition des domaines Mudjatik et Wollaston (ZTMW). Cette zone est caractérisée par l'abondance de paragneiss migmatitiques riches en monazites et par la présence de pegmatites minéralisées (1.85-1.7 Ga). Ces pegmatites seraient une des sources potentielles des gisements de type à discordance du BA. Ces éléments suggèrent que la déformation archéenne (~2.5 Ga) et/ou transhudsonienne (~1.8 Ga) ainsi que la fusion partielle des métasédiments ont joué un rôle majeur dans les mécanismes de pré-concentration et de mise en solution des phases accessoires uranifères (monazite-zircon).

Afin de quantifier ces phénomènes de pré-concentration métamorphiques, nous avons réalisé une étude pluridisciplinaire du socle de la ZTMW. Cette approche consiste à caractériser les relations entre pré-concentrations uranifères et évolution tectono-métamorphique, ce qui implique une étude fine du comportement des phases uranifères durant le métamorphisme et la fusion partielle. L'objectif principal de l'étude est d'établir l'évolution P-T-t-D-M (M : Minéralisation).

Le champ de déformation finie est le résultat de la superposition de deux phases de déformation contemporaines d'une fusion partielle et de la mise en place de différentes générations de pegmatites. La phase D1 correspond à une foliation peu inclinée orientée N90-N110. La phase D2 est à l'origine de la structuration majeure N40 de la ZTMW caractérisé par le développement de zone de cisaillement D2 verticales et est compatible avec un régime transpressif senestre régional.

Les données thermobarométriques suggèrent des conditions au pic du métamorphisme de 5-6 kbar et 800-850°C. Les données géochronologiques obtenues sur monazite et zircon permettront de contraindre ce contexte tectono-métamorphique, les phénomènes de pré-concentration en uranium et d'altération plus tardive.

### 7.3.10 (o) Comment la monazite peut enregistrer et préserver l'âge d'événements métamorphiques successifs de haut grade : l'exemple des métapélites à Grt-Ky du Rhodope Central (Bulgarie, Grèce)

Valérie Bosse<sup>1</sup>, Amélie Didier<sup>2</sup>, Pierre Gautier<sup>3</sup>, Zlatka Cherneva<sup>4</sup>, Milena Georgieva<sup>4</sup>, Ianko Gerdjikov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>LMV, Clermont-Ferrand

<sup>2</sup>Institut des Sciences de la Terre, Université de Lausanne, Suisse

<sup>3</sup>Géosciences Rennes

<sup>4</sup>Faculty of Geology and Geography, Sofia University, Bulgarie

Le faible taux de diffusion du Pb dans la structure cristalline de la monazite, même à température élevée, en fait un géochronomètre robuste susceptible de préserver les âges d'événements métamorphiques successifs. Nous présentons des données texturales, chimiques et des âges U-Th-Pb in situ dans les monazites des métapélites à Grt-Ky des zones de cisaillement de Chepelare (Bulgarie) et Nestos (Grèce) dans le Rhodope central. Les échantillons étudiés ont subi deux épisodes de métamorphisme à haute température : le premier est responsable d'une fusion partielle anhydre dans le faciès des granulites au Mésozoïque, le second implique une fusion partielle hydratée au Cénozoïque. Une déformation ductile intense en présence de fluides est visible dans la majorité des échantillons. La monazite est présente dans la matrice foliée ainsi qu'en inclusion dans le grenat et le disthène. Les monazites de la matrice présentent des évidences de dissolution-recristallisation en présence de fluides. La majeure partie des grains est formée de domaines pauvres en Y donnant des âges entre 115 et 165 Ma. Des domaines riches en Y présentant des âges cénozoïques forment les bordures des grains matriciels ou de petits grains satellites entourant les grains mésozoïques. Les monazites cénozoïques cristallisent au dépend des monazites mésozoïques et incorporent simultanément l'Y provenant de la dissolution partielle du grenat. Dans les deux zones de cisaillement, la croissance des monazites cénozoïques est datée à 36 Ma. Des âges identiques ont été obtenus dans les leucosomes et pegmatites des gneiss migmatitiques environnants indiquant que les fluides responsables de la précipitation des monazites cénozoïques provenaient probablement de la cristallisation de liquides anatectiques adjacents. Ces résultats montrent l'efficacité des processus de dissolution-précipitation dynamique qui favorisent la cristallisation d'une nouvelle génération de monazite pendant la déformation à 36 Ma.

### 7.3.11 (p) Insights from monazite and allanite petrochronology in metasediments from Central Alps

Emilie Janots<sup>1</sup>, Alfons Berger<sup>2</sup>, Daniela Rubatto<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>Uni. Bern, Suisse

<sup>3</sup>ANU, Canberra, Australie

Monazite and allanite are two REE-minerals that are powerful U-Th-Pb geochronometers of metamorphic crystallization, especially for relatively low T metamorphic conditions (typically T<500°C). In both minerals, solid diffusion is inefficient up to elevated temperature, and U-

Th-Pb ages are attributed to (re)crystallization episodes. Correct age interpretations require identification of the processes and conditions under which REE-mineral (re)crystallized. Combining petrology and geochronology (petrochronology) of REE-minerals is hence vital for correlating age with physico-chemical conditions.

In metasediments and veins of the Central Alps, petrochronology of REE-minerals gave precious insights on successive episodes on monazite and allanite crystallization depending on temperature, fluid, fO<sub>2</sub> and deformation. Along the very well studied metamorphic profile of the Central Alps, a general metamorphic sequence Monazite > Allanite > Monazite was identified. Combining in-situ high resolution U-Th-Pb dating of the two minerals enable to fix temporal anchors on the entire orogenic cycle : accretion, metamorphic peak and exhumation. Ages obtained in different part of the Central Alps indicate a diachronism with younger ages found towards the North.

### 7.3.12 (p) Behaviour of monazite during ultra-high temperature metamorphism

Antonin Laurent<sup>1</sup>, Stéphanie Duchene<sup>1</sup>, Anne-Magali Seydoux-Guillaume<sup>1</sup>, Bernard Bingen<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Geological Survey of Norway, Trondheim, Norvège

Ultra-high temperature (UHT) metamorphism (T > 900°C) reflects the most extreme thermal conditions that the continental crust can achieve. It has been proven that monazite is stable under such conditions in rocks of appropriate bulk composition, however its petrogenesis and relationship with the main silicate rock-forming minerals is still poorly understood. The Proterozoic province of Rogaland (South Norway) exhibits typical UHT mineral assemblage such as osumilite + orthopyroxene + hercynite + garnet along with abundant monazite. In the osumilite gneiss two generations of monazite may be distinguished on the basis of their petrostructural position and their Y and Th contents. These two monazite generations may be correlated with contrasted mineralogical paragenesis which have been investigated using P-T-X phase diagrams in the Na<sub>2</sub>O-CaO-K<sub>2</sub>O-FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system. The type-I monazite is shielded into porphyroblastic garnet enclosing sillimanite and biotite interpreted as relicts of a MT-MP metamorphic event. Type-I monazite displays concentric BSE zoning with low Y concentration, moderate ThO<sub>2</sub> content and rare inclusions of zircon. Besides, type-II monazite corresponds to rather large (up to 850 μm) crystals and is found within the M2 decomposition products of garnet consisting of high Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> orthopyroxene blasts and osumilite ?hercynite bands equilibrated around 980-1030 °C and 4-6 kbar at dry and moderately oxidizing conditions. This second monazite type shows a patchy BSE zoning with very high content of ThO<sub>2</sub> and abundant inclusions of peak temperature hercynite along with magnetite, pyrite, pyrrhotite as well as zircon. Further isotopic study in these monazite crystals will investigate whether the U-Pb and Th-Pb systems can record the age of the UHT peak-temperature.

### 7.3.13 (p) U-Pb age and geochemistry of authigenic monazites of the Armorican Massif. Implications for formation of monazite-(MREE) from paleozoic shales

Johann Tuduri<sup>1</sup>, Olivier Pourret<sup>2</sup>, Eric Gloaguen<sup>1</sup>, Jérôme Gouin<sup>1</sup>, Sébastien Potel<sup>2</sup>, Wolfgang Dörr<sup>3</sup>, Sébastien Colin<sup>1</sup>, Matthieu Chevillard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais

<sup>3</sup>Goethe-Universität, Frankfurt, Allemagne

Rare earth element (REE) distributions of stream water, normalized to upper continental crust (UCC), showed, from the source to the catchment outlet, fractionation patterns from heavy REE enriched to more flat and middle REE (MREE) enrichment, together with a progressive disappearance of a negative Ce anomaly. As a consequence, it is suggested that the continental shelf could be considered as a potential trap for MREE resources, similar to metalliferous deep sea sediments, defining new guide for offshore exploration. The reassessment of the REE potential of France, led us to discuss the behavior of REEs, from the continental shelf to the basin plain, using authigenic monazite occurrences within ordovician shales and black shales from Brittany (France). Monazite grains (up to 2 mm in diameter) are mostly characterized by their grey color, host-rock mineral inclusions, REEUCC distribution patterns enriched in MREE, low Th and U contents, lack of inherited cores. Chemical composition highlights zoned crystals with MREE enriched cores (up to : 10 wt% Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ; 1.3 wt% Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 5 wt% Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and light REE (LREE) enriched rims. Thus grain cores are characterized by negative and low values of  $\log[(La/Sm)_{UCC}]$  and high values of Eu whereas rims have slightly negative to positive values of  $\log[(La/Sm)_{UCC}]$  with low Eu concentrations. REEUCC patterns in grey monazite also reflect the abundance of these elements in shales and black shales. Indeed, at near neutral to alkaline pH, monazite evidenced MREE enriched patterns directly linked to organic matter (OM) content, whereas at alkaline pH, REE speciation is mainly driven by carbonate complexation, resulting in the formation of the LREE enriched monazite. These data strongly suggest authigenic crystallization of monazite during deep diagenesis to very low grade metamorphism conditions as highlighted by U/Pb monazite age dating by TIMS at  $384 \pm 1.6$  Ma. Eventually, such monazites were later concentrated within placers @ 2 kg/t.

## 7.4 Archéométrie - Géoarchéologie

### (Archeometry - Geoarchaeology)

**Responsables :**

- Sandrine Baron (TRACES, Toulouse)  
sbaron@univ-tlse2.fr
- Margot Munoz (GET, Toulouse)  
margot.munoz@lmtg.obs-mip.fr

**Résumé :**

Datation, traçage de sources, caractérisations physico-chimique d'artefacts (obsidiennes, silex, matériaux de construction, métal, os...) font partie des approches de l'archéométrie nécessaire pour soulever des verrous archéologiques et historiques telles que la circulation des matériaux ou la restitution des procédés de fabrications aux périodes anciennes. Les approches archéométriques et géoarchéologiques sont également dédiées à la prospection de structures enfouies et à la reconstitution des techniques d'exploitation des ressources et de production des matériaux. L'étude de l'altération des matériaux du patrimoine est aussi un domaine de recherche venant à l'appui des connaissances nécessaires pour leur préservation. A côté de la compréhension de l'utilisation des ressources du milieu par l'homme, ayant permis l'évolution de sociétés à travers les âges, un des axes de recherche actuels consiste à étudier l'action de l'homme sur son environnement ; les collaborations interdisciplinaires sont alors un atout majeur. Enfin, en retour de la mise en œuvre d'approches propres aux Sciences de la Terre et en complément des Sciences Humaines, l'adaptation des méthodes aux questions spécifiques à ces domaines est à l'origine de développements analytiques et de nouvelles connaissances utiles pour les Sciences de la Terre.

**Abstract :**

Dating, tracing sources, physico-chemical characterization of artefacts (obsidians, flints, building materials, metal, bones ?) are a part of archaeometrical approaches necessary to unlock archaeological and historical bolts such as circulation of materials or identification of manufacturing processes in the ancient periods. The archaeometrical and geoarchaeological approaches are also dedicated to the prospection of buried structures, the reconstruction of resources exploitation techniques and the materials production. The study of the alteration of the heritage materials is also a field of research coming in support of the knowledge necessary for their conservation.

Besides the understanding of the use of resources of environment by human beings, which have allowed the evolution of societies through ages, one of the areas of current research consists in studying the action of human beings on their environment. The interdisciplinary collaborations come then as a major advantage. Finally, in return of the implementation of Earth Sciences approaches and as a supplement to the Human Sciences, the adaptation of the methods to the specific questions in these domains is the base of analytical developments and of new useful knowledge for the Earth Sciences.

#### 7.4.1 *Keynote communication* : L'art des mines aux temps de Rome en Dacie (Nord-Ouest Roumanie)

Béatrice Cauuet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire TRACES, Toulouse

En 106, un nouvel espace économique s'ouvre au nord-est de l'empire romain, la Dacie, conquise par Trajan contre le roi dace Décébâl. Les atouts de ce territoire reposent sur d'importantes réserves en or, argent et électrum au centre des Carpates (N-O Roumanie). Au N-E des Monts Métallifères, une intense activité minière s'est déroulée depuis l'Antiquité à Rosia Montana (l'antique Alburnus Maior), un espace minier de 14km<sup>2</sup>. En lien avec un vaste projet de réexploitation à ciel ouvert, des fouilles préventives et programmées du milieu souterrain se sont déroulées de 1999 à 2013 sous ma direction. L'archéologie minière menée dans les réseaux souterrains a révélé une exploitation romaine intensive datée du II<sup>e</sup> s. de notre ère. Elle a transformé le cœur des massifs en un vaste dédale de travaux juxtaposés et les versants en larges haldes. A ce jour, six massifs ont livré d'importants vestiges romains qui s'étagent sur plus de 100 m de hauteur (plus de 7km de travaux linéaires). Les chantiers pour l'essentiel ouverts à la pointerolle et au pic, présentent tous des sections en trapèze, typiques de la région. Les réseaux s'articulent en galeries de recherche, descenderies, chambres sur piliers et chantiers verticaux ou étagés. Le transport des produits, minerais et stériles, se faisait à dos de mineurs. Des systèmes d'exhaure par roues élévatoires à augets en bois ont été découverts dans deux des mines. Les roues sont encore dans leur logement et tout le dispositif technique conservé peut être étudié dans le détail. De nombreux équipements en bois ont été également trouvés, très bien conservés dans le milieu souterrain : boisages, plates-formes, échelles, brancards, canaux de drainage. Les réseaux miniers antiques de Rosia Montana apparaissent comme un espace minier romain remarquable, exceptionnellement bien conservé où la qualité de la dynamique d'exploitation et de la gestion de l'espace nous révèle un art des mines très maîtrisé dès les premiers siècles de notre ère.

#### 7.4.2 (o) Apport du LIDAR pour la prospection des mines antiques en alluvions. Le cas de l'étain du Morvan

Béatrice Cauuet<sup>1</sup>, Matthieu Boussicault<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire TRACES, Toulouse

Sur les pentes boisées sud et est d'Autun de nombreux travaux miniers de surface sont connus depuis 2004. Le BRGM y signale une forte anomalie à cassitérite au sein d'alluvions et d'arènes granitiques. Ce complexe de travaux de 300ha exploitait par lavage des dépôts stannifères. On retrouve un réseau de canaux et bassins fossiles en amont de chantiers creusés en forme de ravins et de cirques. L'eau captée venait des étangs du domaine de Montjeu. Cette technique minière décrite par Pline pour l'or alluvial (33, 74-77) a permis de désagréger et creuser le matériau par un courant d'eau qui le débourbait, tout en concentrant les grains de cassitérite à forte densité (6,99 g/cm<sup>3</sup>). Transportés à la base du flux, ils devaient se déposer dans un sluice muni de pièges (végétaux pubescents) en aval des chantiers d'abatage. En 2005, la fouille de deux canaux d'alimentation d'un chantier-ravin (100mx20m, 4m prof.) a livré des céramiques romaines. La cartographie et l'interprétation spatiale et dynamique de ces chantiers miniers antiques pour étain permettent d'en mesurer l'extension, la complexité et le recoupement de structures qui révèlent plusieurs phases d'activité espacées dans le temps. Mais vu la difficulté de l'étude de travaux situés en sous-bois, il n'était pas aisé de dresser le plan des ensembles. L'obtention d'un LIDAR de 60km<sup>2</sup> centré

sur Autun qui a pu être acquis, pour partie, grâce à l'ANR MineMet, a permis de progresser dans nos recherches. Les travaux d'inventaire et de plan des vestiges sont en cours grâce à l'analyse du modèle numérique de terrain généré en 2013 par l'acquisition du relevé Lidar. La qualité de ce Lidar permet d'effectuer une topographie très détaillée des structures minières, comme les canaux, bassins et chantiers, dans un paysage boisé où la vue d'ensemble était jusque-là masquée par la densité du couvert végétal. Les premiers résultats sont spectaculaires et le relief du sol caché par la forêt se lit parfaitement comme pour un sol dégagé.

#### 7.4.3 (o) Les bas fourneaux de la Montagne Noire, mode d'emploi. Bilan de vingt années de recherche sur la sidérurgie romaine, entre archéologie, archéométrie et expérimentations.

Marie-Pierre Coustures<sup>1</sup>, Didier Béziat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire TRACES, Toulouse

<sup>2</sup>GET, Toulouse

Entre le I<sup>er</sup> s. av. J.-C. et le III<sup>e</sup> s. ap. J.-C., le versant audois de la Montagne Noire a été le siège d'une production sidérurgique massive. Dans le cadre de l'Empire romain, ce fer a alimenté le commerce à longue distance comme l'a montré l'étude de la provenance des barres de fer de plusieurs épaves romaines retrouvées au large des Saintes-Maries-de-la-Mer en Méditerranée (Baron et al., 2011). Les bas fourneaux, structures métallurgiques dans lesquelles s'effectuait la transformation du minerai en métal, étaient regroupés en batteries ; leur nombre important, de même que la masse considérable de scories produites, témoignent de l'intensité de la production. Comment se déroulaient les opérations métallurgiques qui y étaient conduites ?

Pour restituer le protocole qui présidait au déroulement d'une opération de réduction directe telle que la pratiquaient les Anciens, on s'est appuyé sur la comparaison minéralogique et chimique des déchets retrouvés sur les ateliers romains et de ceux qui ont été produits par l'expérimentation archéologique. Celle-ci a été réalisée dans des bas fourneaux reconstruits à Lastours (Aude) sur le modèle des structures archéologiques découvertes sur l'atelier du domaine des Forges aux Martyrs (Aude). Le croisement de ces données issues de l'archéométrie et des données archéologiques recueillies sur d'autres centres sidérurgiques antiques ayant recouru à des fourneaux d'un type similaire, notamment en Autriche dans le Ferrum Noricum, permettent de proposer aujourd'hui le mode d'emploi des bas fourneaux romains de la Montagne Noire.

Baron S., Coustures M.-P., Béziat D., Guérin M., Huez J., Robbiola L. 2011, Lingots de plomb et barres de fer des épaves romaines des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône) : questions de traçabilité comparée, Revue Archéologique de Narbonnaise, 44, p. 71-98.

#### 7.4.4 (o) L'Homo erectus de Kocabaş : utilisation innovante des nucléides cosmogéniques

Anne-Elisabeth Lebatard<sup>1</sup>, Didier Bourlès<sup>1</sup>, Pierre Rochette<sup>1</sup>, Mehmet Cihat Alçiçek<sup>2</sup>, Samir Khatib<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>Department of Geology, Pamukkale University, Turquie

<sup>3</sup>Laboratoire Départemental de préhistoire du Lazaret, Nice

Au cours des 40 dernières années, le développement de la Spectrométrie de Masse par Accélérateur a permis d'élargir les applications des nucléides cosmogéniques à un nombre croissant de domaines des géosciences telles que la géomorphologie, ou la tectonique. Outre le plus célèbre d'entre eux, le 14C, d'autres nucléides cosmogéniques (en raison de leurs demi-vies [T1/2] plus importantes) tels que le 10Be (T1/2 ~ 1,4

Ma), l'<sup>26</sup>Al (T<sub>1/2</sub> ~ 0,7 Ma) et le <sup>36</sup>Cl (T<sub>1/2</sub> ~ 0,3 Ma) commencent également à être utilisés pour des problématiques archéologiques et paléanthropologiques depuis la dernière décennie.

La méthode de datation par durée d'enfouissement basée sur le rapport <sup>26</sup>Al/<sup>10</sup>Be produit in situ a déjà été appliquée pour dater des sites majeurs en Afrique du Sud, Espagne, Chine et Inde, apportant ainsi des contraintes chronologiques solides pour la reconstruction de différentes étapes de nos origines.

Récemment cette méthode a été utilisée avec succès pour caractériser la durée d'enfouissement de deux conglomérats encadrant un dépôt de travertin d'où provient le crâne de Kocaba? (Denizli, Turquie). Cette série a fait l'objet d'une étude pluridisciplinaire afin d'apporter un calage temporel robuste à ce fossile. En effet, l'importance de ce fossile réside dans sa proximité morphologique avec les Homo erectus de l'Est africain et de la Chine, son association avec des faunes typiques Villafanchien final et sa localisation géographique sur un des chemins migratoires possibles entre l'Afrique et l'Europe. Outre les nouvelles recherches paléanthropologiques et paléontologiques, une étude systématique de la stratigraphie, de la magnétostratigraphie, ainsi qu'une datation par durée d'enfouissement ont été menées dans le cadre de ce projet Franco-Turque. La polarité inverse enregistrée dans les niveaux conglomératiques qui recouvrent le travertin fossilifère associée avec les durées d'enfouissement <sup>26</sup>Al/<sup>10</sup>Be déterminées sur ces mêmes niveaux contraignent un âge de dépôt de ce travertin antérieur à l'intervalle normal Cobb Mountain débutant à 1,22 Ma. Cette étude atteste de l'antiquité de l'occupation humaine sur la péninsule anatolienne et remet en cause les connaissances actuelles de la dispersion Homo erectus en Eurasie. Fait intéressant, la chronologie obtenue implique un synchronisme avec le peuplement initial de l'Europe et fournit la preuve la plus solide de l'Homo erectus en Asie occidentale.

#### 7.4.5 (o) Les caractéristiques pétrographiques et minéralogiques des obsidiennes : de nouveaux marqueurs pour l'obsidien sourcing ?

Anne-Kyria Robin<sup>1</sup>, Damase Mouralis<sup>2</sup>, Ebru Akköprü<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de géographie physique, Meudon

<sup>2</sup>IDEES, Rouen

<sup>3</sup>Université de Van, Turquie

L'Anatolie est connue pour ses nombreuses sources d'obsidienne. Durant la préhistoire, ce matériau a souvent été exploité et diffusé sous forme d'artefacts (couteaux, pointes de flèche...) dans toute le Moyen-Orient et au-delà. Depuis les travaux pionniers de Renfrew en 1964, l'étude des provenances d'obsidienne (obsidian sourcing) utilise les caractéristiques chimiques de cette lave afin de retrouver les sources d'où le matériau brut a été extrait. L'obsidienne est donc utilisé comme un marqueur des processus de diffusion (matériaux, techniques de taille, outils, populations) des sources géologiques jusqu'aux sites archéologiques. Cette méthode se fonde sur le principe de signature chimique propre à chaque volcan, voire à chaque coulée. Néanmoins il existe une certaine variabilité conférant à certains échantillons une incertitude sur leur provenance.

Nous proposons ici de compléter la définition de la signature chimique qui permet de retrouver une aire géographique, par l'analyse pétrographique des échantillons qui permet de définir des caractéristiques physiques (fractures, quantité et taille des cristaux, altération, bandes, plis...). Celles-ci s'avèrent utile pour déterminer la taillabilité du matériau (présence d'hétérogénéités) et pour retrouver la position de l'obsidienne dans une coulée et.

Nous complétons cette étude pétrographique par la définition des cortèges minéralogiques déterminées par les analyses en microsonde

(WMS). Si les obsidiennes comportent plus ou moins les mêmes familles de minéraux (feldspath et pyroxènes) la microsonde donne chaque espèce permettant de différencier les sources en leur attribuant un contexte de formation (source du magma, contamination etc). Notre étude se concentre sur les obsidiennes de 5 régions volcaniques d'Anatolie orientale : Tendürek, Nemrut, Muş, Bingöl et İkizdere. Les différentes analyses chimiques, pétrologiques et minéralogiques permettent de caractériser chaque obsidienne 1) en fonction de la région volcanique à laquelle elle appartient, 2) de situer cette obsidienne à l'intérieure d'une coulée, 3) de retracer la formation et la mise en place des affleurements d'obsidienne.

#### 7.4.6 (o) Stratégies d'approvisionnement au cours du Paléolithique supérieur dans le Sud-ouest de la France : caractérisation du silex dit « grain de mil »

Solene Caux<sup>1</sup>, Jean-Guillaume Bordes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PACEA, Pessac

Les choix de gestion des ressources et des territoires se posent dès la Préhistoire : pour fabriquer leur équipement lithique, les groupes humains ont sélectionné, parmi les silex disponibles dans leur environnement, ceux qui répondaient à leurs besoins technologiques. Un silex d'excellente qualité dit « grain de mil » par les préhistoriens a été remarqué dès les années quatre-vingts dans de nombreux sites archéologiques de l'ensemble du Bassin aquitain : ce matériau présente donc une aire de diffusion particulièrement étendue par rapport à celle des autres ressources du Sud-ouest de la France. La seule observation macroscopique a pu entraîner des confusions dans la détermination de ce matériau en contexte archéologique ainsi que dans l'origine de ses lieux de collecte. Bien que des gîtes de silex « grain de mil » aient été mentionnés en Charente-Maritime dans les années deux-mille, des matériaux semblables ont également été mentionnés en Dordogne. Nous avons donc réalisé une analyse comparative des matériaux de l'ensemble de la plateforme nord-aquitaine, sur la base de plus de trois-cents gîtes prospectés. L'adaptation d'outils méthodologiques de la géologie sédimentaire et de la micropaléontologie nous a permis de caractériser les microfaciès sédimentaires épigénisés par les silex et de proposer pour chaque type de matériau une origine géologique. Ces résultats montrent que le silex dit « grain de mil » est spécifique de la région de l'Anticlinal de Jonzac (Charente-Maritime) et s'est formé par épigénie des calcaires Coniacien-Santonien. La détermination de l'origine du « grain de mil » modifie les schémas d'approvisionnement jusqu'à présent admis pour le Paléolithique supérieur notamment en terme de distance : cette ressource, collectée dans l'extrême Nord-ouest du Bassin aquitain a diffusé jusque dans les Pyrénées soit plus de 400 km.

#### 7.4.7 (o) La pétroarchéologie du silex, un outil de paléogéographie préhistorique. L'exemple du Badegoulien en Auvergne (Massif central, France).

Vincent Delvigne<sup>1</sup>, Audrey Lafarge<sup>2</sup>, Paul Fernandes<sup>1,3</sup>, Michel Piboule<sup>4</sup>, Jean-Pierre Bracco<sup>5</sup>, Gérard Vernet<sup>6,7</sup>, Jacques Virmont<sup>8</sup>, Jean-Paul Raynal<sup>1,9</sup>

<sup>1</sup>PACEA, Talence

<sup>2</sup>Archéologie des Sociétés Méditerranéennes, Lattes

<sup>3</sup>Paléotime, Villard-de-Lans

<sup>4</sup>Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble

<sup>5</sup>Laboratoire méditerranéen de préhistoire Europe-Afrique, Aix en Provence

<sup>6</sup>Laboratoire de Géographie physique et environnementale,  
Clermont-Ferrand

<sup>7</sup>Institut National de Recherches Archéologiques Préventives,  
Clermont-Ferrand

<sup>8</sup>sans affiliation, Tourzel-Ronzières

<sup>9</sup>Department of Human Evolution, Max Planck Institute, Leipzig,  
Allemagne

La pétroarchéologie du silex s'attache à définir les origines des silex retrouvés dans les sites archéologiques. Au vu des avancées méthodologiques récentes : définition toujours plus précise des faciès, vision dynamique du parcours du silex dans son environnement (chaîne évolutive), mise en place d'une cartographie précise des domaines minéraux siliceux etc, il est aujourd'hui possible de distinguer non seulement le lieu de formation du silex (le gîte primaire) mais également son lieu de collecte (gîte primaire ou secondaire).

L'étude exhaustive des silex de collections archéologiques du Paléolithique supérieur a permis la mise en évidence d'une diversité insoupçonnée de matériaux représentatifs d'un vaste litho-espace (espace géographique comprenant l'ensemble des matériaux considérés). A cet égard, nous avons développé un modèle de représentation de l'origine et de l'acquisition des matières premières retrouvées sur un site archéologique, non plus sous une forme sito-centrée (en étoile), mais sous une forme qui serait plus en accord avec les données issues des observations ethnographiques (réseau de lieu sensu Debarbieux). La représentation, au sein des industries lithiques, des différents types de matériaux, ainsi que leurs modes d'introduction sur le site, permettent de distinguer les choix opérés par les hommes et les contraintes naturelles subies, autorisant dès lors l'inscription sémantique du litho-espace dans un essai de reconstruction du paléo-espace social.

Afin d'illustrer nos propos nous nous appuyons sur les résultats obtenus pour quatre sites du Badegoulien (20 500 à 19 000 BP) d'Auvergne ayant bénéficié d'études récentes et/ou de campagnes de datation : le Rond-du-Barry (Haute-Loire), La grotte Cottier (Haute-Loire), La Roche-à-Tavernat (Haute-Loire) et la Contrée Viallet (Allier).

#### 7.4.8 (o) Formation d'inclusions fluides lors du traitement thermique du silex barrémo-bédoulien : implications archéométriques

Jean Milot<sup>1,2</sup>, Luc Siebenaller<sup>1</sup>, Didier Béziat<sup>1</sup>, Vanessa Lea<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>TRACES, Toulouse

A la fin du cinquième millénaire av. J.C., les sociétés néolithiques méditerranéennes montrent d'importants changements socio-économiques. Le développement d'une industrie lithique spécialisée au sein des sociétés chasséennes du département du Vaucluse et la dissémination de la production à l'échelle européenne atteste ces changements. Le silex barrémo-bédoulien constitue la matière première de cette industrie lithique. Les recherches archéologiques menées sur le sujet ont permis de mettre en évidence le traitement thermique systématique de ces silex, ce qui améliore le tranchant des lamelles débitées par pression. On peut alors distinguer les sites producteurs qui maîtrisent cette technique des sites consommateurs qui ne la maîtrisent pas.

Nos observations au microscope de silex archéologiques et géologiques, chauffés et non chauffés ont permis de mettre en évidence l'apparition d'inclusions fluides induite par le traitement thermique. Nos analyses microthermométriques montrent que ces inclusions contiennent de l'eau pure qui résulte de la déshydratation de la calcédoine de type quartzine, selon le modèle proposé par Schmidt, 2012 (libération d'eau structurale et fermeture de la porosité la plus fine). Nos résultats ont permis de définir plus précisément la température de traitement thermique utilisée par les artisans Chasséen, autour de 230°C. Nous proposons le modèle de

la nû cocotte-minute z pour expliquer la migration d'eau liquide dans les nodules de silex à 230°C. La capacité d'un silex à être chauffé dépend donc (1) de sa teneur en quartzine qui contrôle la quantité d'eau libérer lors de la chauffe et (2) du volume total de porosité disponible pour stocker cette eau de déshydratation. Le bon équilibre entre ces facteurs explique la bonne capacité du silex barrémo-bédoulien à être chauffé et permet de comprendre les raisons de l'indéniable succès de ce silex au sein des sociétés chasséennes, pendant près de 700 ans.

#### 7.4.9 (o) Altération des silex taillés : processus de formation de la « patine blanche »

Solene Caux<sup>1</sup>, Alain Queffelec<sup>1</sup>, Jean-Guillaume Bordes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PACEA, Pessac

En contexte archéologique, les silex taillés présentent une altération de surface appelée « patine blanche » par les préhistoriens. Cette altération variable d'un site à l'autre mais aussi au sein d'un même gisement, est un phénomène dont les principaux paramètres sont encore méconnus. Par corrélation avec les verres de silice présentant une altération semblable suite à une attaque basique ou acide, la patine blanche est souvent imputée au pH du sédiment du site archéologique. Cependant, les silex ne sont pas des verres de silice car leur structure minéralogique est composée de silice amorphe et cristallisée, en proportions variables selon le type de matériau envisagé. Afin de comprendre le processus de formation de quantifier l'intensité de la patine blanche en contexte archéologique, nous avons testé d'une part l'influence du pH du milieu extérieur, et d'autre part l'influence des paramètres intrinsèques à la matière. Les résultats de cette expérience montrent que les silex ne sont pas sensibles aux pH acide et neutre tandis qu'un pH basique entraîne régulièrement la formation d'une patine blanche. Cependant, les différents types de silex ne réagissent pas de façon identique à une attaque basique : la réaction chimique est fonction du réseau cristallin du silex, lui-même défini conjointement par la texture du calcaire épigénisé et par les proportions relatives de chaque phase de silice représentée. La compréhension de ce processus d'altération a de nombreuses répercussions à différents niveaux de l'étude d'un site archéologique tant en termes de taphonomie du gisement en discutant des processus d'altération différentielle des artefacts, qu'en termes de conservation des vestiges suite à la fouille.

#### 7.4.10 (o) Signatures géologiques et archéologiques d'exploitation ancestrale de ressources hydrocarbonées de subsurface

Marie-Agnès Courty<sup>1</sup>, Thierry Ge<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Procédés et Matériaux Solaires, Perpignan

<sup>2</sup>Institut National de Recherches Archéologiques Préventives, Pessac

Les diagnostics et les fouilles archéologiques préventives en Aquitaine ont révélé l'exploitation de matériaux carbonés en milieu humide synchrone d'occupations depuis le Néolithique jusqu'au Moyen-âge. L'exploration archéologique montre des architectures terre/bois et des vestiges de fours de réduction, associées dans les zones humides à un réseau de fossés en conduites de bois et de bassins de décantation. Ces indices sont considérés comme liés au traitement de matériaux organiques locaux : production de résine, de poix ou de lin. Cette présentation vise à démontrer l'exploitation ancestrale de ressources hydrocarbonées exploitées des milieux humides locaux (zones inter-dunaires, vallées, terrasses) sur la base de données géoarchéologiques et multi-analytiques. L'étude présentée repose sur l'étude des résidus solides associés aux structures aménagées et aux vestiges archéologiques (revêtements internes de céramiques et meules). Les analyses en ESEM, TEM,

XRD, spectrométrie Raman et FTIR révèlent la présence de nanocomposites à base de polymères et carbone graphitique riches en métaux purs, sulfures et chlorures métalliques (Fe-Cr-Ni, Ni, Cu-Zn, Au, Ag). Cet assemblage est caractéristique de débris retombés au sol issus de matériaux naturels synthétisés par aéroplasma à partir de précurseurs terrestres, qui ont formé des accumulations d'hydrocarbures dans des zones de piégeage. Ces composés sont tracés aussi bien dans le remplissage organo-minéral des dépressions humides que dans les structures archéologiques ou sur les vestiges. Ces données attestent d'aménagements hydrauliques des bas-fonds humides destinés à l'extraction par filtration/décantation de matériaux hydrocarbonés. La nature des résidus identifiés dans les vestiges archéologiques atteste d'une excellente maîtrise des techniques de transformation des matériaux hydrocarbonés en vue de la production de combustibles à haut pouvoir calorifique et de résines, matières colorantes ou composés phytosanitaires.

#### 7.4.11 (o) Marbres, calcaires et granites utilisés en deux cimetières argentins, détérioration et préservation

Silvia Irene Carrasquero<sup>1</sup>, Sandra Adam<sup>1</sup>, Gabriel Eilers<sup>1</sup>

<sup>1</sup> FCNyM-Universidad Nacional de La Plata, Argentina

Les matériaux du patrimoine tels les calcaires et les marbres utilisés sont détériorés par le contact avec l'atmosphère via des processus physico-chimiques, biologiques ou climatiques. En vue de leur préservation, une étude de ces matériaux est indispensable pour comprendre les modalités de construction, les processus d'altération mais aussi les pratiques socio-culturelles. La présente recherche propose l'étude de deux citées anciennes, La Plata et Azul (localisées en Argentine), dont l'influence européenne est marquée par les migrations des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles. Cette influence se traduit i) dans le choix des matériaux qui ont été utilisés et ii) les styles architectoniques choisis pour bâtir les monuments funéraires. Le but de cet exposé oral est de discuter les caractéristiques patrimoniales des matériaux employés.

La première cité étudiée ici, nommée La Plata et fondée en 1882, est située à 60 km au Sud-Est de Buenos Aires. Le cimetière, construit en 1887 par P. Benoit (émigré Français en Argentine), présente une porte monumentale ornée de colonnes doriques. Un monument, dédié à la famille Pagés, présente une iconographie égyptienne et a été construit avec une pierre appelée piriapolita provenant d'Uruguay.

La deuxième cité étudiée ici, nommée Azul et fondée en 1832, est une ville située au centre de la Pampa Argentine, à 300 Km au Sud-Ouest de Buenos Aires. Le cimetière a été construit en 1850. La richesse ornementale est très variée : les marbres sont italiens et les calcaires argentins. On trouve d'autres types de monuments comme des obélisques dont un a été construit avec un calcaire noir, très résistant, de la région. Actuellement, nous sommes en train de réaliser une carte de chaque cimetière selon i) les types de matériaux utilisés, ii) la qualité du matériel, iii) sa résistance au climat et iv) les modalités de détérioration. Ces renseignements nous permettront d'obtenir des données importantes sur les causes et les processus (naturels vs anthropiques) de la détérioration pour aider ensuite à la préservation du patrimoine.

#### 7.4.12 (p) Production d'or affiné à l'époque gauloise en Limousin. Analyses des produits de la chaîne opératoire restituée par l'expérimentation

Laurène Bonville<sup>1</sup>, Marguerite Munoz<sup>2</sup>, Béatrice Cauuet<sup>1</sup>, Calin Tamas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire TRACES, Toulouse,

<sup>2</sup>GET, Toulouse

<sup>3</sup>Département de Géologie, Université Babeş-Bolyai, Département de Géologie, Roumanie

Peu d'études ont traité des techniques de production d'or durant la Protohistoire. Cependant, les Gaulois ont produit de nombreux objets qui montrent un titre en or très élevé. En Limousin, d'importants vestiges témoignent de fortes compétences en mine et en métallurgie qui s'inscrivent en faux contre l'allégation que seul l'or alluvial aurait été travaillé. De nombreuses excavations minières datant de l'âge du Fer présentent des prolongements en galeries avec boisages et systèmes d'exhaure. Des aires de traitement du minerai et des vestiges de métallurgie ont été découverts au bord des excavations révélant la maîtrise d'une chaîne opératoire qui pouvait produire de l'or affiné.

Des reconstitutions expérimentales, du traitement à la fusion d'un minerai aurifère sulfuré, ont été menées pour mieux caractériser les procédés mis en oeuvre - gestes, structures, enchaînement des opérations - et disposer de produits (creusets, scories, or métal) à comparer avec les objets archéologiques. Pour ces expérimentations, du minerai provenant de la mine d'or moderne de Laurières a été utilisé. L'or est sous forme d'électrum (Ag ~10%) associé à des sulfures, principalement l'arsénoopyrite et à du quartz. L'enrichissement a été conduit en plusieurs étapes, concassage, grillage, broyage et concentration par hydroclassement, pour obtenir un concentré aurifère fondu en creuset dans un bas foyer ouvert. Le produit de fusion a été coulé en une fois dans une lingotière. Ce semi-produit s'est stratifié par différence de densité avec deux niveaux supérieurs correspondant à des scories et un niveau inférieur composé d'or. Les résultats obtenus valident la chaîne opératoire expérimentée en ce qui concerne la séparation de l'or et de la gangue. La présence de plages plurimillimétriques riches en argent dans la scorie indiquerait également que ce mode opératoire contribue à un affinage de l'or, sans adjuvant et en une seule fusion. D'autres étapes on pu néanmoins être mises en oeuvre par les Gaulois pour un meilleur affinage.

#### 7.4.13 (p) Reconnaissance des placers alluviaux exploités en mines antiques : difficultés et méthodes

Frédéric Christophoul<sup>1</sup>, Béatrice Cauuet<sup>2</sup>, Calin Tamas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Laboratoire TRACES, Toulouse

<sup>3</sup>Département de Géologie, Cluj-Napoca, Roumanie

Dans le cadre de l'ANR MINEMET, des placers alluviaux /éluviaux (placers aurifères en Roussillon et en Cerdagne, placers stannifères dans le Morvan) ont été reconnus dans le but de tracer les métaux de gisements exploités dans l'Antiquité jusqu'aux artefacts. Cette reconnaissance fait face à de nombreuses difficultés : 1) la faible concentration des placers qui résulte soit d'une faible concentration inhérente au placer ou d'une conséquence de l'exploitation ancienne (arrêt de l'exploitation suite à la chute du rendement). 2) L'identification précise des horizons porteurs dans le gisement : les chantiers d'exploitation par abatage hydraulique identifiés affectent différentes unités géologiques dont certaines sont stériles. 3) la nécessité d'identifier le minerai dans le gisement (en placer primaire) et non dans des placers secondaires issus de l'exploitation. Ces difficultés nécessitent de mettre en œuvre des méthodes de prospection minière afin d'isoler suffisamment de minerais pour les analyses ultérieures : 1) la cartographie géologique précise des placers ainsi que leur caractérisation (alluvial ou éluvial) afin de déterminer les horizons à forte concentration. 2) Traitement de volumes importants de sédiments afin de palier la faiblesse des concentrations. La concentration primaire s'effectue à la batée, puis à la table à secousse et enfin avec des liqueurs denses (séparation gravitaire, compte-tenu de la forte densité des métaux recherchés, l'or et l'étain).

#### 7.4.14 (p) Apport de l'analyse non-invasive par XRF portable pour l'analyse des matières colorantes préhistoriques : le cas du Châtelperronien

Laure Dayet Bouillot<sup>1</sup>, Francesco D'errico<sup>1,2</sup>, Renata Garcia Moreno<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PACEA, Pessac

<sup>2</sup>Department of Archaeology, History, Cultural Studies and Religion  
University of Bergen, Norvège

Le Châtelperronien représente en Europe de l'Ouest l'une des dernières cultures attribuées à l'homme de Néandertal. L'existence de comportements symboliques chez ce dernier est débattue depuis plusieurs années. Cette hypothèse est soutenue par plusieurs découvertes isolées, dont les plus emblématiques proviennent du Châtelperronien. L'usage de matières colorantes, trait de comportement fréquemment associé à la sphère symbolique, joue un rôle important dans ce débat. L'analyse de la riche collection Châtelperronienne d'Arcy-sur-Cure a montré que les matières premières exploitées sont diverses (Salomon, 2009). Cependant, cette étude est restée isolée. Nous avons cherché à déterminer dans quelle mesure l'usage de matières colorantes chez les Châtelperroniens était répandu et régulier.

L'analyse physico-chimique non-invasive a été privilégiée, afin d'identifier quelles matières premières ont été choisies, selon quels critères et dans quel but. Un appareil de spectrométrie de fluorescence X portable (pXRF) a été utilisé. L'analyse à partir de ce type d'appareil nécessite un ajustement de la méthode de calcul en fonction des matériaux étudiés. Nous présentons ici le travail de calibration des mesures que nous avons effectué afin de pouvoir comparer des échantillons de matières colorantes rouges (roches ferrugineuses) de trois sites Châtelperroniens : Roc-de-Combe, Bidart et le Basté. Nous avons eu recours à des standards certifiés mais également à nos propres références, créés à partir d'échantillons géologiques.

Les résultats obtenus ont servi à caractériser la variabilité des matières premières utilisées en fonction du type de transformation opérée. Nous avons mis en évidence une différence de traitement selon la composition chimique et les propriétés des roches, ce qui montre que la diversité des matières premières observée sur certains sites Châtelperroniens est le résultat de choix délibérés. Une régularité dans l'exploitation s'observe aussi bien dans le temps que dans l'espace. Cette découverte remet en question l'hypothèse selon laquelle l'usage de matières colorantes par les derniers Néandertaliens pourrait être le résultat d'une acculturation par les premiers Hommes Modernes.

Salomon, H., 2009. Les matières colorantes au début du Paléolithique supérieur : sources, transformations et fonctions. Université de Bordeaux 1, Bordeaux, Thèse de Doctorat.

#### 7.4.15 (p) Etude du comportement du manganèse dans l'altération de verres modèles de vitraux médiévaux : influence des microorganismes

Solène Gillette<sup>1</sup>, Anne Perez<sup>1</sup>, Stéphanie Rossano<sup>1</sup>, Nicolas Trcera<sup>2</sup>,  
Jessica Ferrand<sup>1</sup>, David Huguenot<sup>1</sup>, Alexandre François<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Université Paris-Est, Laboratoire Géomatériaux et Environnement,  
Marne-la-Vallée

<sup>2</sup>Synchrotron SOLEIL, Gif Sur Yvette

<sup>3</sup>Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques,  
Champs-sur-Marne

Le manganèse est un élément chimique utilisé depuis longtemps comme chromophore ou décolorant [1] [2] dans l'industrie verrière. Bien qu'en

faible concentration (1 à 2 %pds% de MnO), il intervient de façon dramatique dans le phénomène de brunissement des verres médiévaux potassiques [3]. Ce phénomène, qui conduit à la mise en place de phases brunes à la surface ou dans le verre est encore mal connu et pourrait être lié à la présence de microorganismes sur sa surface.

Afin de comprendre le rôle du manganèse dans le phénomène de brunissement, nous avons étudié son comportement lors de l'altération, en solution, de verres (poudres, monolithes) de composition simplifiée proche de celles des vitraux. Une partie des verres a été recuite sous atmosphère réductrice, l'autre sous atmosphère ambiante afin d'évaluer l'influence du degré d'oxydation du manganèse sur la dissolution du verre.

L'impact de certaines molécules organiques susceptibles d'être excrétées par les microorganismes, comme l'acide oxalique, a été étudié en conditions abiotiques, dans des solutions d'eau ultra pure, en s'affranchissant de la présence de bactéries. Des expériences en eau ultra pure seule ont été également mises en place. Enfin des expériences en conditions biotiques ont permis l'étude de systèmes plus complexes : les verres sont placés au contact d'un milieu de culture en la présence ou l'absence de la souche *Pseudomonas putida*, souche oxydant le manganèse. Toutes ces solutions ont été tamponnées à pH = 6,4. Les verres ont été soumis à l'altération de 4 heures à 10 jours pour les expériences à court-terme (poudres) et jusqu'à 5 mois pour les expériences à long-terme (monolithes), à la température de 25°C. Les éléments relâchés par le verre dans la solution ont ensuite été analysés par ICP-OES et la surface des monolithes et des premières phases d'altération ont été observées au MEB.

[1] R. Arletti et al., *Archaeometry* 52, 99-114 (2010)

[2] P. Mirti et al., *Anal. Bioanal. Chem.* 372, 221-229 (2002)

[3] G. Oriol et al., *L'actualité chimique*, 312-313, 34-39 (2007)

#### 7.4.16 (p) Apport de la caractérisation pétrographique au rapprochement de sites de production et de consommation du sel. Application au site laténien de Brebières « Les Béliers » (Pas-de-Calais)

Adeline Lagneau<sup>1,2</sup>, Grégory Huvellé<sup>1</sup>, Caroline Gutierrez<sup>1</sup>, Lucile Géant-Caparrois<sup>1</sup>, Benoît Bertrand<sup>1</sup>, Michel Dubois<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Direction de l'Archéologie Préventive, Communauté d'Agglomération  
du Douaisis, Douai

<sup>2</sup>Université Rennes

<sup>3</sup>Laboratoire Génie Civil et Géo-Environnement, Lille

A la période gauloise, la chaîne opératoire de production du sel dans le nord de la France est connue à travers de nombreux ateliers de sauniers, cependant les questions relatives aux réseaux de circulation de ce bien restent peu abordées.

Le site de Brebières « Les Béliers », situé à proximité de Douai (Nord), a livré un habitat au sein duquel plus de 6 kg de fragments de moules à sel ont été recueillis. L'absence de toute trace de production de cette denrée in situ fait de cet habitat un témoin important de la consommation de sel et permet d'envisager le commerce et les usages du sel sous l'angle du consommateur. La reconnaissance de différents types synchrones suggère un approvisionnement auprès de plusieurs ateliers. Afin de confronter les données issues des habitats de Brebières à celles de sites alentours, nous proposons, en complément de l'étude céramologique traditionnelle, une étude pétrographique des pâtes. Ce travail a porté sur un échantillon de 144 lots dont l'ensemble a subi un tri macroscopique qui a été comparé à celui effectuées par le céramologue. Un groupe a été ajouté portant de trois à quatre les ensembles de pâtes différenciés. L'observation pétrographique a permis sur une sélection

de 59 préparations d'attester avec des critères minéralogiques la présence de ces 4 entités mais aussi d'affiner cette classification en subdivisant un des ensembles. Ce travail est étayé par l'adoption d'un logiciel d'analyse d'image et par la représentation des résultats sous forme de courbes granulométriques, technique ordinairement employée en sédimentologie. Les critères permettant l'établissement de ces 5 groupes de référence, ont ensuite été examinés sur des tessons issus d'ateliers de sauniers et sites de consommation alentours. Nous proposons de présenter le rapprochement de ces sites archéologiques et d'illustrer l'intérêt de la pétrographie pour alimenter la discussion relative aux réseaux de circulation de cette richesse qu'était le sel.

#### 7.4.17 (p) Prospections géophysiques sur le complexe artisanal de Loron (Istrie Croatie)

Muriel Llubes<sup>1</sup>, Sonia Rousse<sup>1</sup>, Corinne Rousse<sup>2</sup>, Vladimir Kovačić<sup>3</sup>, Claudio Taffetani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Centre Camille Jullian - Archéologie méditerranéenne et africaine, Aix-en-Provence

<sup>3</sup>Zavičajni muzej, Poreštine - Croatie

Le complexe artisanal de Loron, sur la commune de Tar-Vabriga (Istrie-Croatie) appartient à un grand domaine maritime implanté sur le littoral istrien vers 10 ap. J.-C. Il a une vocation productive centrée sur la production d'huile et de vin et la fabrication d'amphores. On sait qu'il a appartenu à des membres importants de l'ordre sénatorial, tels que Sisenna Statilius Taurus, fils cadet du grand Statilius Taurus, ami d'Auguste, et plus tard, Calvia Crispinilla, magistra libidinum Neronis. Il devient ensuite propriété impériale sous Domitien et au moins jusqu'à Hadrien. Afin de mettre en évidence la présence d'autres vestiges archéologiques correspondant à cette grande propriété maritime, des prospections géophysiques (électriques et magnétiques) ont été menées sur deux zones d'intérêt pour l'équipe de fouille archéologiques, avec pour contrainte l'accessibilité des terrains aux méthodes de prospections terrestres (notamment absence de végétation gênante (arbustes, broussailles)). Les deux secteurs sélectionnés ont été (A) la zone Nord-Est du module occidental du complexe artisanal (celui dit des petits thermes serviles) avec pour objectif de préparer une opération archéologique ultérieure et (B) un secteur non boisé sur la côte nord du promontoire (400 m du site) où une citerne a déjà été relevée, ainsi que des alignements de murs sur la plage suggérant la présence d'un vaste secteur résidentiel. Pour la zone A, la prospection magnétique ne fait apparaître aucune structure clairement même si une anomalie d'amplitude équivalente à celle produite par le mur affleurant du module Ouest pourrait être envisagée. Pour la zone B, le traitement préliminaire des données effectué fait apparaître des anomalies claires dont une anomalie très linéaire qui peut être suivie sur plus de 100 mètres. L'aspect rectiligne de cette anomalie évoque une origine anthropique et son intensité est de l'ordre de grandeur des constructions du module Ouest. L'interprétation des anomalies observées sera discutée au regard du contexte archéologique.

#### 7.4.18 (p) Tomographie 3D d'un ferrier archéologique par polarisation provoquée temporelle

Muriel Llubes<sup>1</sup>, Nicolas Florsch<sup>2</sup>, Florian Téreygeol<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Sisyphé, Paris

<sup>3</sup>IRAMAT, Laboratoire Métallurgies et Cultures, Belfort

Les archéologues s'intéressent à la détection et à la quantification des déchets miniers provenant des activités métallurgiques anciennes, car

ils constituent une source d'information concernant l'histoire de la mine et des procédés de traitement du minerai. Les mesures magnétiques peuvent être utilisées pour détecter la présence des accumulations de scories sous la surface, mais il n'est pas possible de déduire la quantité totale de matière, ni de délimiter l'extension en profondeur de ces amas par l'utilisation de cette méthode. Par contre, la méthode électrique de « polarisation provoquée » temporelle, dite PP, permet une évaluation robuste du volume et des concentrations de scories du ferrier. Cette étude reprend un résultat obtenu précédemment sur le site de Castel-Minier (Ariège, France), et qui montrait que la chargeabilité mesurée en PP est proportionnelle à la concentration de scories dans le sol. Cette propriété a permis d'interpréter quantitativement les mesures obtenues par tomographie 3D sur l'un des amas de Castel-Minier. L'ensemble des données en trois dimensions a été enregistré au moyen de pseudo-sections classiques, le long de profils parallèles espacés tous les 1.5m. Le code RES3DINV a fourni un modèle 3D du sous-sol, basé sur l'inversion des données PP mesurées, qui nous permet de délimiter le volume du ferrier. Les chargeabilités sont ensuite converties en valeurs de concentration de scories, pour estimer la masse totale. Enfin, un sondage archéologique a confirmé les résultats de la géophysique.

#### 7.4.19 (p) Caractérisation d'une production d'argent dans les Corbières à l'époque romaine républicaine (IIe-Ier s. av. n. è.)

Julien Mantenat<sup>1</sup>, Marguerite Munoz<sup>2</sup>, Christian Rico<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TRACES, Toulouse

<sup>2</sup>GET, Toulouse

L'exploitation des minerais de cuivre, plomb et argent revêt une importance capitale dans les sociétés antiques, étant donné en particulier le rôle joué par le cuivre et l'argent dans les processus de thésaurisation. Or, les modalités de traitement de ces minerais ne sont pas toujours clairement identifiées pour cette période à l'échelle du bassin méditerranéen. C'est plus particulièrement vrai dans le cas des minerais argentifères autres que la galène, dont bien peu de sites de traitement ont été étudiés jusqu'à ce jour. C'est ce point qu'il s'est agi d'aborder dans le cadre d'une thèse de doctorat en archéologie, en focalisant les recherches sur le massif des Corbières (Aude), où se concentrent un ensemble de gisements miniers Cu-Ag-Pb.

Combinant une longue enquête archéologique (inventaire systématique des indices d'extraction et de traitement des minerais non-ferreux, études techniques...) et une approche archéométrique (étude minéralogique et analyses chimiques des minerais et des déchets de traitement métallurgique), ces recherches ont permis d'identifier un ensemble de pôles d'exploitation de minerais argentifères, témoins d'une intense mise en valeur des ressources minières du massif des Corbières aux II<sup>e</sup> et I<sup>er</sup> s. av. n. è. L'analyse conjointe des minéralisations explorées par les mineurs antiques et des déchets de traitement métallurgique de ces minerais démontrent que cette activité était centrée sur l'exploitation de minerais de cuivre-argent de la famille des tétraédrites (dits cuivres gris), destinée à produire de l'argent, mais aussi, certainement, du cuivre. Ces résultats fournissent pour la première fois en Méditerranée nord-occidentale la preuve directe d'une production d'argent fondée sur l'exploitation de gisements de cuivre-argent durant l'Antiquité. Ils invitent à réévaluer la place de ce type de gisement dans l'économie des métaux non-ferreux du bassin méditerranéen à cette époque.

#### **7.4.20 (p) Vers une détermination exhaustive de la provenance des obsidiennes en Méditerranée Occidentale : élaboration d'une stratégie analytique**

Marie Orange<sup>1</sup>, François-Xavier Le Bourdonnec<sup>2</sup>, Carlo Lugliè<sup>3</sup>,  
Ludovic Bellot-Gurlet<sup>4</sup>, Stéphan Dubernet<sup>2</sup>, Renaud Joannes-Boyau<sup>1</sup>,  
Gérard Poupeau<sup>5</sup>, Anja Scheffers<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Southern Cross GeoScience, Southern Cross University, Australie*

<sup>2</sup>*Institut de recherches sur les Archéomatériaux - Centre de Recherche en Physique appliquée à l'Archéologie, Pessac*

<sup>3</sup>*Università di Cagliari, Dipartimento di Storia, Cagliari, Italie*

<sup>4</sup>*MONARIS, Paris*

<sup>5</sup>*Histoire Naturelle de l'Homme Préhistorique, Paris*

L'obsidienne était une matière première précieuse de l'industrie lithique néolithique. En Méditerranée occidentale, elle se trouve parfois dans les sites archéologiques très éloignés des quatre « îles-sources » de Lipari, Palmarola, Pantelleria et Sardaigne. Si entre ces sources l'analyse visuelle ne permet d'attribuer qu'entre 70 et 85% des artefacts d'un site à un gisement potentiel, il est en revanche presque toujours possible d'identifier l'origine ce matériau à partir de sa composition chimique. Comme il est nécessaire de traiter un nombre important d'objets archéologiques, la construction d'une stratégie analytique adaptée est aujourd'hui indispensable. Celle-ci combine l'approche visuelle aux caractérisations instrumentales par SEM-EDS, EDXRF, pXRF, PIXE et LA-ICP-MS. Des analyses exhaustives, réalisées sur plus de 6000 pièces (France continentale, Corse, Sardaigne, Tunisie), intégrées aux études typo-technologiques permettent de dessiner les modalités d'acquisition de cette ressource et d'étudier les chaînes opératoires afin de mener une discussion synchronique et diachronique sur la circulation de l'obsidienne au Néolithique.

## Colloque de Launay - Congrès international de Métallogénie

### Responsables :

- Stefano Salvi (GET, Toulouse)  
stefano.salvi@get.obs-mip.fr
- Didier Béziat (GET, Toulouse)  
didier.beziat@get.obs-mip.fr
- Marieke van Lichterfelde (GET, Toulouse)  
marieke.van-lichterfelde@get.obs-mip.fr

### 7.5 Colloque de Launay - Afrique : Quoi de neuf en métallogénie ?

### Responsables :

- Mark Jessell (GET, Toulouse)  
mark.jessell@get.obs-mip.fr
- Mohammed Bouabdellah (Faculté des Sciences, Oujda, Maroc)  
mbouabdellah2002@yahoo.fr

**Résumé :** Cette session a pour objet de faire un état des lieux des recherches menées en Afrique au cours de cette dernière décennie, par les chercheurs francophones sur les ressources minérales. Tous les types de minéralisations (or, gemmes, métaux de base, métaux rares, ...) et tous les contextes géologiques depuis le Précambrien jusqu'au Quaternaire pourront être traités.

### 7.5.1 (o) Lumwana polyphased Cu-mineralization in the high-grade internal zone of the Lufilian belt (Zambia) : petrographic, micro-structural and geochronological constraints

François Turlin<sup>1</sup>, Aurélien Eglinger<sup>1</sup>, Olivier Vanderhaeghe<sup>1</sup>,  
 Anne-Sylvie André-Mayer<sup>1</sup>, Marc Poujol<sup>2</sup>, Julien Mercadier<sup>1</sup>, Etienne  
 Deloule<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GeoRessources, Nancy

<sup>2</sup>Géosciences Rennes

<sup>3</sup>CRPG, Nancy

The Pan-African Lufilian orogenic belt hosts world-class syn- to epigenetic Cu-Co deposits and epigenetic U mineralizations within the evaporitic and siliciclastic Neoproterozoic metasedimentary rocks (Lower Roan group). The first Cu mineralizing event is syn- to late-diagenetic of these sequences, controlled by BSR processes and preserved in the External fold-and-thrust belt (DRC). The second one is related to TSR processes and occurs in or close to the Domes region (Zambia). It is synchronous to the Pan-African metamorphism affecting the Lower Roan sequences. Cu and U occurrences in the Domes region are hosted by kyanite-micaschist. The timing of the Cu mineralization and the nature of the protolith of the micaschist are debated. Petrography, deformation relative chronology and geochronology evidence :

- a sedimentary kyanite-micaschist protolith for Lumwana as shown by inclusions of graphite and sulfides in first kyanite generation (Ky1) (peak of pressure). Sulfides define an inherited S0-n schistosity. The next step will be to associate this metasedimentary sequence with the Neoproterozoic Katanga metasedimentary cover which may evidence the link with the Cu-U mineralization in RDC, or with a metasedimentary part of the Paleoproterozoic basement.

- a polyphased Cu mineralization through the Lufilian orogenic evolution marked by a second Cu-mineralization linked to the synorogenic exhumation. Evidences are the sulfides associated to the Sn+I schistosity and second kyanite generation (Ky2) (peak of temperature). The two generations of sulfides display different geochemical signatures. This second mineralization occurs between ca. 580 and 630°C (geothermometry on rutile and garnet/biotite), and 550-510 Ma (Th-Pb ages on syn-metamorphic monazite).

Moreover, the circulation of metamorphic Cu- and U-rich brines in Lolwa and Mitukuluku has been dated around ca. 530 Ma. It is consistent with the age on uraninite grain from the Lumwana mine dated at ca. 540 to 530 Ma by the U-Pb method.

### 7.5.2 (o) Caractérisation géochimique et pétrographique de magmatisme mafique-ultramafique de l'événement tectonomagmatique de Kibaran, Burundi

David Evans<sup>1,2</sup>, Tharcisse Songore<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Natural History Museum, London, Royaume-Uni

<sup>2</sup>Carrog Consulting, Geological Consultant, Versailles

<sup>3</sup>Danyland Burundi, Bujumbura, Burundi

L'événement tectonomagmatique Kibarien constitue la mise en place Mésoproterozoïque d'un grand volume de magma bimodale dans la croûte de l'Afrique centrale. Il pourrait éventuellement être considéré comme une grande province ignée, qui s'étend du nord de la Namibie au sud-ouest de l'Ouganda avec un âge de 1375 Ma. La composante mafique-ultramafique de ce magmatisme contient d'importants, mais encore inexploités, gisements de sulfures de Ni-Cu-EGP et latérite de Ni-Co, notamment au Burundi et le nord-ouest de la Tanzanie.

Dans l'est du Burundi, ce magmatisme mafique-ultramafique prend deux formes différentes : 1) des petits corps chonolithiques ou tubulaires, riches en olivine et minéralisés en sulfures ; 2) des sills mafiques latéralement étendus, minces et non-minéralisés. Des recherches antérieures ont porté sur les corps riches en olivine et minéralisés, sans aucune considération pour le potentiel des sills pour l'orientation de l'exploration. Pour remédier à cela, nous avons étudié la pétrologie et la minéralogie d'un sill non-minéralisé de la zone Rujungu, de l'est du Burundi.

Le sill, d'environ 4m d'épaisseur, est nettement différencié en une partie supérieure avec une texture « spinifex » grossier et une partie inférieure granulaire contenant des traces de sulfures. Les minéraux magmatiques sont pour la plupart altérés en uralite (pyroxènes) et saussurite (plagioclase), dans le faciès des schistes verts. Toutefois, les textures magmatiques ont été bien conservées. Des pseudomorphes de petits grains d'olivine squelettique sont présents dans les zones figées à grains fins du 10cm des contacts supérieur et inférieur. La géochimie est typique de magma basaltique riche en Mg et contaminée par les sédiments, et se distingue par l'épuisement de tous les éléments chalcophiles. Nous concluons que le magma parental du sill a été saturé en soufre et ses éléments chalcophiles ont été dépouillés par un événement de minéralisation antérieur. De ce fait, on pourrait dire que la composition des sills conserve la signature de la minéralisation, ce qui pourrait s'avérer utile dans l'exploration.

### 7.5.3 (o) Que nous apprennent les compositions des sulfures (pyrite et arsénopyrite) associés aux minéralisations aurifères du craton Ouest-africain ?

Didier Béziat<sup>1</sup>, Luc Siebenaller<sup>1</sup>, Stefano Salvi<sup>1</sup>, German Velasquez<sup>2</sup>,  
 Olivier Bruguier<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Universidad Central de Venezuela Instituto de Ciencias de la Tierra,  
 Caracas, Venezuela

<sup>3</sup>Géosciences Montpellier

Pour cette étude systématique, nous avons utilisé plus de 500 échantillons de pyrite et d'arsénopyrite provenant de 16 gisements d'or du craton ouest-africain. Dans ces divers gisements, la minéralisation est encaissée dans des formations d'âge paléoproterozoïque de nature diverse, soit sédimentaire, soit magmatique. La minéralisation peut être filonienne ou disséminée et dans chacun des gisements nous pouvons mettre en évidence plusieurs générations d'un même sulfure. Les grains d'or visibles se trouvent soit en micro-inclusions soit en remplissage de fractures dans les sulfures. Ils sont systématiquement accompagnés par d'autres minéraux tels l'ankérite, l'albite et tout un cortège de sulfures et tellurures dont la nature peut varier suivant le gisement. Les analyses des sulfures, réalisées par un système d'ablation laser nanoseconde couplé avec un spectromètre de masse à plasma inductif (LA-ICP-MS), mettent en évidence la présence d'or « invisible » à des concentrations souvent inférieures à la ppm mais pouvant dans certains cas dépasser la centaine de ppm. L'or est systématiquement associé à d'autres métaux comme le Cu, As, Ag, Sb, Te, Pb et Bi, soit en substitution dans le réseau cristallin du cristal, soit sous forme de nano-inclusions de sulfosels polymétalliques. Cet or « invisible » représenterait l'or primaire du gisement. Une étude statistique a été réalisée sur l'ensemble des données afin de vérifier si on obtenait une signature chimico-minéralogique propre à chaque gisement dépendante ou non de la nature de l'encaissant, de la profondeur de mise en place, et si au sein d'un même gisement on pouvait faire une distinction entre les différentes générations d'un même sulfure.

### 7.5.4 (o) Apports de la datation à la compréhension de processus métallogéniques dans le craton ouest-africain

Elodie Le Mignot<sup>1,2</sup>, Laurie Reisberg<sup>2</sup>, Anne-Sylvie André-Mayer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Géoressources, Nancy

<sup>2</sup>CRPG, Nancy

Les gisements d'or birimiens du craton ouest-africain ont connu un regain d'intérêt ces dernières années, suite à l'augmentation du cours de l'or. Cependant, ces gisements ayant jusque-là fait l'objet d'une exploitation essentiellement artisanale, la plupart d'entre eux sont mal connus et leur mode de formation ainsi que leur âge sont très mal contraints. Pour mieux comprendre les processus métallogéniques mis en jeu, cinq gisements d'or ouest-africains situés au Burkina Faso et au Ghana ont été caractérisés grâce à des études pétrographiques, minéralogiques, structurales et à des analyses d'inclusions fluides, avant d'être datés par la méthode Re-Os. Les minéraux datés sont des sulfures (majoritairement des pyrites) dont la cristallisation est synchrone du dépôt de la minéralisation aurifère, ce qui permet d'obtenir des contraintes géochronologiques directes sur le (les) événement(s) minéralisateur(s).

Les résultats suggèrent un polyphasage de la minéralisation en or à l'échelle du craton puisque les âges obtenus s'étalent de 2163 ± 21 Ma pour le gisement le plus ancien (Wassa, Ghana) à 2051 ± 110 Ma pour le plus récent (Damang, Ghana). Par ailleurs, les datations ont permis d'identifier des gisements précoces datés à ~2160 Ma (Wassa, Ghana; Gaoua et Kiaka, Burkina Faso) s'étant formés au début, voire avant l'orogénèse éburnéenne dont la période d'activité est estimée à 2150-2000 Ma (Feybesse et al., 2006). La formation de ces gisements précède donc le dépôt des sédiments tarkwaïens (2133 ± 4 Ma; Pigois et al., 2003) qui hébergent une part importante des réserves d'or du craton sous forme de paléo-placers dont la source n'est à ce jour pas connue. Par conséquent, nos résultats permettent de proposer ces gisements précoces comme des sources possibles pour l'or des conglomérats tarkwaïens. D'autre part, deux gisements plus tardifs et typiquement orogéniques (Nassara, Burkina Faso; Damang, Ghana), ont également été étudiés et datés entre 2100 et 2050 Ma.

### 7.5.5 (o) Genèse de la minéralisation aurifère de Kalana (Mali-sud, birimien Ouest Africain) : Rôle d'une remobilisation tardi-orogénique

Adama Sangaré<sup>1</sup>, Stefano Salvi<sup>2</sup>, Youssef Driouch<sup>3</sup>, Luc Siebenaller<sup>1</sup>,  
 Didier Béziat<sup>2</sup>, M. Belkasm<sup>3</sup>, Pierre Debat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IamGold Corporation, Bamako, Mali

<sup>2</sup>GET, Toulouse

<sup>3</sup>Département de Géologie, Faculté des Sciences Dhar El Mahraz,  
 Université Mohamed Ben Abdallah, Fès, Maroc

Le gisement aurifère de Kalana est situé au sein des séries métavolcano-sédimentaires birimiennes recoupées par des petites intrusions de diorite. Ces séries sont affectées par l'orogénèse éburnéenne associée à un métamorphisme de faciès schiste vert. La minéralisation aurifère est accompagnée d'une altération à chlorite, muscovite, ankérite et est associée à deux groupes de veines de quartz recoupant la schistosité régionale : elles se distinguent par leur pendage, orientation, épaisseur et densité ; une génération recoupe l'autre. Une minéralisation primaire se fait en domaine ductile sous forme d'inclusions d'or micrométriques dans l'arsénopyrite. Un important stock d'or secondaire apparaît par la suite en domaine cassant avec de l'or natif centimétrique associé à la chalcopryrite, pyrrhotite, sphalérite, galène, sulfures de Bi et Bi natif.

Les deux phases de minéralisation s'inscrivent dans un continuum de déformation du ductile au fragile. Au cours de cette évolution on note une évolution dans les fluides associés à la minéralisation. Trois générations d'inclusions fluides ont pu être distinguées : 1) des inclusions fluides (IF) primaires à H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>±CH<sub>4</sub> (Qtz-1); 2) IF à H<sub>2</sub>O dans le Qtz-2 provenant de la recristallisation du Qtz-1 ; et 3) des IF secondaires à H<sub>2</sub>O-CH<sub>4</sub>±CO<sub>2</sub>. Les IF à H<sub>2</sub>O ont une faible salinité (< 6% eq NaCl), et Th entre 138°C et 226°. Les fluides à CO<sub>2</sub> dominant ont Th de ~260°C et densité entre 0,72 et 0,98 tandis que les fluides à CH<sub>4</sub> dominant ont Th de ~290°C et densité entre 0,43 et 0,79. Les fluides associés à la minéralisation primaire sont riches en CO<sub>2</sub> alors que les fluides secondaires liés à la phase de remobilisation d'or primaire sont riches en CH<sub>4</sub>. Ces facteurs, contrôlant la distribution économique de l'or associée au réseau de fractures et veines tardi-orogénique, constituent un contexte de mise en place particulier et différent de celui des autres gisements mésothermaux birimiens (Milesi et al. 1992 ; Béziat et al. 2008).

### 7.5.6 (o) Primary gold deposition linked to aqueous fluids in the Inata gold deposit (Burkina Faso) : Evidence from sulphides and fluid inclusions geochemistry

Luc Siebenaller<sup>1</sup>, Stefano Salvi<sup>1</sup>, Philippe Boulvais<sup>2</sup>, Sékou Sangaré<sup>1</sup>,  
 German Velasquez<sup>3</sup>, Jérôme Ganne<sup>1</sup>, Didier Béziat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>3</sup>Géosciences Rennes

<sup>4</sup>Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela

The Inata gold deposit is hosted by metavolcano-sedimentary units that were affected by several pre-, syn- and post-mineralization deformation stages and greenschist-facies metamorphism during the Eburnean orogeny. Early-D1 E-W oriented structures host anhedral pyrite of metamorphic origin, rich in Ni, Co, As and Cu (concentrations measured by in-situ LA-ICPMS). The Au/Ag ratio of this early pyrite generation is very low (<0.05). During the ore stage (D2, N-S oriented shear-zones), sulphides occur as euhedral pyrite and arsenopyrite, characterised by high Au/Ag ratios (>1). Concentrations of arsenopyrite are highest close to quartz-ankerite-albite veins and decrease gradually with distance, whereby pyrite becomes the dominant sulphide furthest from the veins. Visible gold is essentially found within fractures crosscutting sulphides associated to late stage transpressive D3 structures. This gold is interpreted to be the result of remobilization of early, disseminated gold, related to the D2 ore stage.

Analyses of fluid inclusions (FI) revealed different H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> ratios as well as δD values of H<sub>2</sub>O for each deformation stage. Fluid geochemistry, obtained by in-situ LA-ICPMS analysis of FI, allowed distinguishing different fluid compositions. Early D2 ore-stage fluids are characterized by low salinities, low CO<sub>2</sub>, and low K and Ca concentrations, and are rich in B, Ag, Pb, As and REE. Zones in quartz veins containing these aqueous fluids are also marked by higher δ<sup>18</sup>O values (>15‰) than D1, late D2 and D3 related quartz veins. In contrast, late D3 fluids related to remobilization are rich in CO<sub>2</sub> and K and do not contain most of the latter trace elements. Trapping conditions of FI related to early D2 stage are of 410 (±30) °C and 1.75 (±0.25) kbar, whereas those related to the D3 event where trapped from 320 to 360°C and between 1.1 to 1.5 kbar. The Inata gold deposit thus represents a very rare example where nearly pure aqueous mineralizing fluids are documented.

### 7.5.7 (o) Associations minérales paragenétiques d'un Sulfure Massif Volcanogène à Zn-Pb-Cu dans les séries de roches vertes birimienne de Tiébéle (Burkina Faso, Afrique de l'Ouest)

Hermann Ilboudo<sup>1</sup>, Urbain Wenmenga<sup>1</sup>, Martin Lompo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Géosciences et Environnement Minier, Ouagadougou, Burkina Faso

Dans les formations précambriennes datées Paléoproterozoïque de la ceinture de roches vertes (birimien) de Tiébéle, au Sud du Burkina, une minéralisation de type Sulfure Massif Volcanogène (VMS) a fait l'objet d'étude récente.

Dans cette zone spécifique, les formations géologiques sont dominées par des laves mafiques à intermédiaires (métabasalte, métaandésite); intercalées par des roches felsiques (métarhyolite, métadacite) et des roches sédimentaires (métapélite, schiste graphitique et métachert). Ces métafomations sont recoupées par des intrusions de gabbro-diorite et de stock de granitoïde associant des dykes acides témoins des phases ultimes de différenciation du magma granitique. Ces intrusions sont associées à un métamorphisme de contact (faciès amphibolite) avec altération de roche impliquant le passage de fluide minéralisateur (silice-carbonate).

Du point de vue métallogénique, les minéralisations en amas de sulfures s'organisent en deux niveaux distincts séparés par un stockwork de veine de quartz-carbonate. Le niveau supérieur est à sphalérite - galène - pyrite - chalcopryrite ± bornite encaissé par des métasédiments chertueux et graphitiques. Le niveau inférieur contient sphalérite - galène - pyrrhotite - pyrite ± chalcopryrite encaissée par des roches métavolcaniques/volcanoclastites felsiques et mafiques (talcschiste). L'assemblage minéral d'altération hydrothermale associé aux minéralisations sont : (i) quartz-séricite/mica blanc ± chlorite dans les formations felsiques volcanique et volcanoclastique; (ii) quartz - mica blanc dans les formations métasédimentaires; et enfin (iii) Mg-Fe chlorite - trémolite - talc - calcite ± dolomite dans les formations mafiques.

Les investigations de détail combinant la diffraction au RX et le MEB, révèlent quatre paragenèses minérales à savoir :

- (i) une paragenèse à sphalérite-galène-chalcopryrite±altaite±hessite ;
- (ii) une paragenèse à sphalérite-galène-pyrite ;
- (iii) une paragenèse à pyrrhotite-pyrite-galène-sphalérite±altaite ;
- (iv) une paragenèse à magnétite-sphalérite-chalcopryrite.

Ces associations ont été décrites dans plusieurs gisements de type VMS au Canada et en Australie. Du reste, quoique l'arsenopyrite (sous ses formes) brille par absence, l'existence des tellures de plomb et d'argent associée pourraient-elle justifier les traces d'or enregistré, et de penser à l'existence d'un Au-VMS dans cette région ?

### 7.5.8 (o) A reappraised model for non-sulfide zinc deposits of Morocco

Flavien Choulet<sup>1</sup>, Nicolas Charles<sup>2</sup>, Luc Barbanson<sup>3</sup>, Yan Chen<sup>3</sup>, Stanislas Sizaret<sup>5</sup>, Yannick Branquet<sup>3</sup>, Aomar Ennaciri<sup>4</sup> Lakhlifi Badra<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Chrono-Environnement, Besançon

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

<sup>3</sup>ISTO, Orléans

<sup>4</sup>Managem, Marrakech, Maroc

<sup>5</sup>Université Moulay Ismaïl, Meknès, Maroc

Recent improvement of mineral processing techniques caused a renewal of interest in non-sulfide Zn ores throughout the world. In Northern Africa, the origin of the numerous Zn-Pb supergene ore deposits

is not clearly understood. Six non-sulfide Zn-Pb ore deposits hosted in the Liassic limestone have been investigated in the Moroccan High Atlas. Ore occurs either in veins associated with a faulted anticline, or in orthogonal fractures or stratabound horizons in tilted strata. A vertical zoning from deep Zn-Pb sulfide stratabound lenses to shallow non-sulfide ores is reported. Zn (Pb) carbonates, silicates and hydrated minerals directly replace the sulfide ores or filled cavities along fractures related to the Atlasic events. Field observation and multidisciplinary mineralogical characterization (Raman, SEM, EPMA...) have revealed the following evolution : 1) formation of the protore sulfides, 2) early supergene weathering with formation of Zn ?Pb-bearing carbonates and iron oxo-hydroxides replacing protore sulfides and 3) late supergene weathering with deposition of Zn-carbonates, silicates and hydrated phases. Direct replacement of Zn-Pb sulfides controlled by pyrite oxidation is accompanied by precipitation of zinc non-sulfide minerals in cavities or karst-related internal sediments filling. Additional measurement of the anisotropy of the magnetic susceptibility (AMS) from both ore and karstic internal sediments has revealed consistent directions and horizontal magnetic fabrics, and the magnetic lineation usually parallels the direction of the calamine veins. The attitude of the AMS parameters indicates an absence of significant deformation supporting that the magnetic fabric originates from sedimentary dynamics within the veins. The consistence of the primary directions of the magnetic remanence suggests that non-sulfide ore deposits and karst-related internal sediments are contemporaneous. We therefore calculated average paleomagnetic directions and the corresponding poles are consistent with the last 30 Ma of the Apparent Polar Wander Path of Africa. These promising results pave the way for an efficient method to constrain the age of Zn supergene deposits. The proposed three-step scenario will be replaced in the tectonic evolution of the Moroccan High Atlas belt.

### 7.5.9 (o) Nature et evolution des fluides du porphyre a Mo-Cu de Bled M'Dena (massif Eglab, partie sud-occidentale de l'Algérie)

Karima Lagraa<sup>1</sup>, Didier Béziat<sup>2</sup>, Stefano Salvi<sup>2</sup>, Pierre Debat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universite d'Oran, Faculte des Sciences de la Terre, Geographie et Amenagement du Territoire, Oran, Algérie

<sup>2</sup>GET, Toulouse

La minéralisation à Mo-Cu de type porphyre de la structure de Bled M'Dena, située dans le massif des Eglab, s'est mise en place dans un contexte d'arc insulaire et est contenue dans un pluton de composition monzodioritique à granodioritique d'âge Paléoproterozoïque. La géochimie des éléments en trace des composants du pluton indique une lignée calco-alkaline présentant les caractéristiques typiques (rapports Sr/Y et La/Yb très élevés) des granitoïdes associés aux porphyres à Cu ± Mo ± Au (e.g. Richards, 2011). Deux principales paragenèses minéralisées sont distinguées : (1) molybdénite - chalcopryrite - pyrite et (2) chalcopryrite - pyrite - galène associées à une altération propylitique caractérisée par la séricitisation des plagioclases, la chloritisation des biotites et des amphiboles et le développement très important de filonets de chlorite, de calcite et de quartz.

L'étude pétrographique et microthermométrie des inclusions fluides du complexe volcano-plutonique de Bled M'Dena a permis de définir plusieurs types d'inclusions fluides primaires, notamment, des inclusions aqueuses avec un ou plusieurs minéraux fils associées à des inclusions riches en vapeur, ainsi que des inclusions aqueuses avec un rapport V/L ≈ 20. Les phases solides sont des sels (halite et sylvite), des carbonates (calcite et sidérite), des sulfates (anhydrite) et des sulfures (molybdénite et chalcopryrite). Les températures d'homogénéisation (Th) varient selon les types d'inclusions fluides de 130°C à 400°C, pour des densités de respectivement de 0,96 à 0,7 g/cm<sup>3</sup>. Ces variations dans les Th s'expliquent par l'existence d'au moins deux fluides

différents : i) un fluide de salinité modérée (5% à 10% pds éq. NaCl) de basse température et un autre fluide de forte salinité (>22% pds éq. NaCl) de haute température. Ces fluides minéralisés présentent les caractéristiques des gisements de type porphyre classiquement rencontrés dans les Cordillères phanérozoïques, mais beaucoup plus rarement dans les formations paléoprotérozoïques, notamment celles du craton Ouest-africain.

### 7.5.10 (o) Etude des minéralisations cuprifères de la couverture adoudounienne de la boutonnière de Bou Azer El Graara : le cas du gisement de Ibel Lassel (anti-atlas, Maroc)

Hugo Bourque<sup>1</sup>, Luc Barbanson<sup>1</sup>, Stanislas Sizaret<sup>1</sup>, Claire Ramboz<sup>1</sup>, Aomar Ennaciri<sup>2</sup>, Mustapha El Ghorfi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>Managem, Casablanca, Maroc

<sup>3</sup>Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, Maroc

Les minéralisations cuprifères encaissées dans la couverture paléozoïque de l'Anti-Atlas sont nombreuses (plus de 200 d'après Bouchta & al 1977) et leur mode de mise en place reste encore mal contraint. L'hypothèse syngénétique est communément avancée, les minéraux de cuivre précipitant à la faveur de changement de l'état d'oxydation contrôlé par l'environnement de dépôt ; l'aspect fissural de la minéralisation résulterait d'une remobilisation tectonique tardive de cette minéralisation syngénétique (Skacel, 1993). Cette étude est focalisée sur le gisement cuprifère de Jbel Lassel qui est localisé dans la couverture paléozoïque de la boutonnière de Bou Azer El Graara. Les roches encaissantes appartiennent au Groupe de Tata, il s'agit d'une alternance de dolomies et de siltites dans lesquelles s'intercalent localement des niveaux de lave. Structuralement les corps minéralisés sont situés dans une zone plissée et les différentes coupes réalisées montrent une concentration de la minéralisation au niveau des charnières des anticlinaux. La minéralisation apparaît, à l'échelle macroscopique, sous forme de disséminations et d'un stockwork. A l'échelle microscopique et à celle du MEB, la minéralisation qui apparaissait comme disséminée macroscopiquement montre exactement la même texture, la même composition minéralogique et les mêmes relations chronologiques entre les phases minérales que celles observées dans les veines du stockwork. L'analyse en composante principale de la base de données géochimiques, fournie par la société Managem, a permis de distinguer plusieurs groupes correspondant aux différentes lithologies ainsi qu'à la minéralisation cuprifère. Cette dernière ne présente aucune liaison significative avec les lithologies distinguées. L'ensemble de ces observations apporte de solides arguments en faveur d'une origine épigénétique de la minéralisation cuprifère du gisement de Jbel Lassel et d'une mise en place contemporaine ou postérieure à la déformation.

Bouchta R., Boyer F., Routhier P., Saadi M. et Salem M., 1977. L'aire cuprifère de l'Anti-Atlas (Maroc) ; permanence et arêtes riches. C. R. Acad. Sci. Paris, v. 284 p 503-506.

Skacel J., 1993. Gisement cuprifère polygénétique de Tazalagh (Anti-Atlas occidental). Mine, Géologie & Energie 54, p127-133.

### 7.5.11 (o) Age des événements magmatiques et hydrothermaux du district polymétallique de Tighza-Jbel Aouam (Maroc Central)

Leïla Tarrieu<sup>1</sup>, Alain Cheillet<sup>1</sup>, Dominique Gasquet<sup>2</sup>, Magali Rossi<sup>1</sup>, Hassan Bounajma<sup>3</sup>, Tristan Mantoy<sup>3</sup>, Lofti Ouazzani<sup>3</sup>, Lahcen Ouchtouban<sup>3</sup>, Etienne Deloule<sup>4</sup>, Jean-Louis Paquette<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire EDYTEM, Le Bourget du Lac

<sup>2</sup>ENSG, Nancy

<sup>3</sup>Compagnie Minière de Touissit, Casablanca, Centre minier de Tighza, Province de Khénifra, Morocco

<sup>4</sup>CRPG, Nancy

<sup>5</sup>Laboratoire Magma et Volcans, Clermont-Ferrand

Le district polymétallique W-Au, Pb-Zn-Ag et Sb-Ba de Tighza-Jbel Aouam, Meseta centrale (Maroc), était classiquement interprété comme un gisement magmatique-hydrothermal développé dans l'encaissant de petites apophyses granitiques calco-alcalines tardi-hercyniennes. La disposition spatiale des différents épisodes minéralisés relevait d'un mécanisme de zonation concentrique autour d'un hypothétique batholite granitique caché. De nouvelles données gravimétriques (El Dursi, 2009) et géochronologiques U/Pb sur zircons et monazites (Tarrieu, 2014) permettent aujourd'hui d'élaborer un scénario plus complexe pour ce secteur. La minéralisation W-Au se développe dans l'intervalle 295-280 Ma et est associée avec un épisode magmatique essentiellement représenté par une intrusion cachée associée à une large auréole d'altération hydrothermale à caractère potassique (biotitisation). Les concentrations de nature filonienne, en stockworks ou réseaux parallèles, disséminées ou développées dans des skarns les rapprochent du type porphyre. Ces minéralisations recoupent les petits stocks affleurant caractérisant un premier épisode magmatique daté à 320-300 Ma. Le gisement de Pb-Zn-Ag actuellement exploité se développe au cours d'un événement magmatique-hydrothermal daté à  $254 \pm 16$  Ma, déconnecté de l'épisode à W-Au, et de caractère épithermal. Le district polymétallique de Tighza-Jbel Aouam apparaît donc comme représentatif d'un style cordillérain avec développement de minéralisations successivement de type porphyre puis épithermal en association avec un magmatisme calco-alcalin à caractère pulsatoire. Le régime transpressif tardi-hercynien à permo-triasique caractéristique de cette région favorise la mise place d'un magmatisme et de fluides associés dont les sources sont à rechercher aussi bien dans le manteau sous-jacent que dans la croûte.

### 7.5.12 (o) Revue des minéralisations polymétalliques (Fe-Pb-Zn-REE-U) du district minier de Nefza (N. Tunisie) : rôle du contexte géodynamique et du magmatisme miocène

Sophie Decrée<sup>1</sup>, Christian Marignac<sup>2</sup>, Jean-Marc Baele<sup>3</sup>, Johan Yans<sup>4</sup>, Riadh Abidi<sup>5</sup>, Fakhher Jamoussi<sup>6</sup>, Jean-Paul Liégeois<sup>7</sup>, Daniel Demaiffe<sup>8</sup>, Thierry De Putter<sup>7</sup>, Christian Hibschi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bruxelles, Belgique

<sup>2</sup>GeoRessources, Nancy

<sup>3</sup>Université de Mons, Belgique

<sup>4</sup>Université de Namur, Département de Géologie, Belgique

<sup>5</sup>Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis El Manar, Tunisie

<sup>6</sup>CERTE, Laboratoire de Georessources, Hamam-Lif, Tunisie

<sup>7</sup>Musée royal de l'Afrique centrale, Tervuren Belgique

<sup>8</sup>Université Libre de Bruxelles, Campus du Solbosch, Bruxelles, Belgique

Le district minier de Nefza, situé dans la « Zone des Nappes » (NO Tunisie), est connu pour ses nombreuses minéralisations polymétalliques mises en place dans des formations d'âge essentiellement mio-pliocène. Parmi celles-ci :

- une minéralisation de type Iron Oxide Copper Gold, davantage enrichie en REE et en U qu'en Cu et Au, contemporaine de la formation de la brèche structurée en anneau de l'Oued Bélif, laquelle recoupe des formations sédimentaires d'âge (?) turonien-miocène,
- des gisements syndiagénétiques à Fe-Pb-Zn de type Sedex (Sédimentaire exhalative), mis en place dans des séries volcano-sédimentaires

miocènes (bassins de Sidi Driss et de Douahria),  
- des gisements de Fe (parfois accompagnés de minéralisations de Mn), qui ont imprégné des séries mio-pliocènes, en particulier dans les bassins de Tamra et de Douahria,  
- des minéralisations à (Ba-Sr)-Zn-Pb ± Hg, le long de l'accident de Ghardimaou-Cap Serrat.

Tant les contraintes de terrain que géochimiques et isotopiques (Sr, Nd, Pb) indiquent que ces minéralisations sont génétiquement liées aux roches magmatiques miocènes (granodiorite, rhyolites, basaltes) appartenant au magmatisme post-collisionnel de la marge maghrébine en Tunisie. Dans le district minier de Nefza, c'est la circulation de fluides hydrothermaux induite par la mise en place des roches magmatiques qui a entraîné la formation des minéralisations polymétalliques observées. Ces roches magmatiques constituent en outre un stock potentiel de métaux pour ces minéralisations, comme le suggèrent plus particulièrement les compositions isotopiques du Pb.

Nous relierons le magmatisme du district minier de Nefza, de même que les minéralisations qui lui sont associées, aux réactivations mio-pliocènes post-collisionnelles des grandes zones de cisaillement héritées de l'orogénèse varisque au sein de l'ancienne marge passive métacratonique.

### 7.5.13 (p) Données gîtologiques sur l'indice d'or d'Akilet Deilel (massif des Eglab, Dorsale Réguibat, Algérie)

Hocine Benramdane<sup>1</sup>, Hanafi Benali<sup>2</sup>, Omar Kolli<sup>2</sup>, Abdelhak Boutaleb<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Département Sciences de la Terre et de l'Univers, Laboratoire de Recherche, Université Tlemcen, Algérie

<sup>2</sup>Département Sciences de la Terre, Université USTHB, Algérie

L'indice d'or d'Akilet Deilel est localisé dans le massif des Eglab Eglab (sud-ouest algérien). Ce dernier forme la partie NE de la Dorsale Réguibat (branche nord du Craton Ouest-africain) et montre des séries cristallophyliennes à volcanosédimentaires et magmatiques, d'âge paléoproterozoïque (2,2-2,07 Ga), structurées par l'orogénèse éburnéenne.

Le massif est constitué de deux domaines (domaine Eglab à l'Est et domaine Yetti à l'Ouest) dont l'histoire commune a débuté vers 2,09 Ga, date de leur collage. La zone de collage ou Zone de Jointure Yett-Eglab a évolué en zone de cisaillement transcurrente senestre, orientée NW-SE. Les formations qui y affleurent sont dominées par des séries volcano-sédimentaires (séries Yetti et Akilet Deilel) et des roches magmatiques post-orogéniques (granitoïdes Yetti et Aftout).

Les travaux de prospection menés dans cette zone ont mis en évidence des indices intéressants notamment l'indice aurifère d'Akilet Deilel. L'étude préliminaire de ce dernier montre l'existence de deux types de minéralisation aurifère :

(i) une minéralisation filonienne associée à un accident cisaillant à déformation ductile/fragile. Elle s'étale en discontinue suivant une bande orientée NNW-SSE. Les filons de puissance décimétrique et de longueur décamétrique montrent un minerai à texture rubanée avec imprégnations de sulfures et grains d'or. Les sulfures (chalcopyrite, galène, pyrite, sphalérite), arsénopyrite et cuivre gris sont associés au quartz. L'or est essentiellement supergène.

(ii) une minéralisation disséminée associée à des niveaux lenticulaires de tufs de la série Akilet Deilel. La minéralisation est observée sous forme de liserés fins et discontinus d'extension centimétrique. Les minéraux sulfurés (pyrite, chalcopyrite) sont liés à la matrice. L'or est invisible.

Cette minéralisation aurifère, en liaison avec des accidents cisaillants montrent les caractères des gîtes d'or orogéniques, bien connu en Afrique de l'Ouest.

### 7.5.14 (p) Les caractéristiques géochimiques, minéralogiques de différentes ciments d'Algérie

Amina Belalia<sup>1</sup>, Hanafi Benali<sup>1</sup>, Sidali Kortebi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>USTHB, Alger, Algérie

Cette étude a permis de comparer les quatre ciments de différentes régions de l'Algérie (Mefteh au centre, Beni Saf à l'ouest et celle de Msila et Hdjar Soud à l'est).

Du point de vue minéralogique le Ciment de Msila contient une faible teneur en C3A par rapport aux trois autres (un CRS ne doit pas dépasser 5% en C3A), d'autre part le ciment de Mefteh affiche un pourcentage de 5% ce qui fait qu'il peut être utilisé pour un béton dans les canalisations des eaux moyennement agressives.

Du point de vue microscopique le clinker de Msila a subi un refroidissement un peu long ce qui a donné de petits cristaux de C2S collé au C3S.

Les clinkers des quatre cimenteries ont subi un passage rapide dans la zone de clinkerisation.

Les quatre ciments utilisent des ajouts différents :

La cimenterie de Mefteh utilise le calcaire comme ajout, pour la cimenterie de Hdjar Soud elle ajoute du laitier au ciment, pour Beni Saf c'est la pouzzolane qui est utilisé comme ajout, en fin le ciment de Msila est sans ajout.

L'étude minéralogique et microscopique a montré que les quatre ciments (Msila, Hdjar-Soud, Mefteh et Beni Saf) répondent aux normes de l'industrie cimentière.

This study compares the four cements from different regions of Algeria (Mefteh center, Beni Saf in the west and that of Msila Hdjar Soud and to the east).

From the mineralogical point of view Msila cement contains a low C3A compared to the other three (a CRS must not exceed 5% C3A), on the other side cement Mefteh displays a percentage of 5% which is it can be used for a concrete water pipes in the moderately aggressive.

From a microscopic view, Msila clinker suffered a bit long cooling which gave small crystals of C3S C2S stuck to. The cement clinkers four underwent a rapid shift in the burning zone.

The four cements using different additions : The cement Mefteh uses limestone as an addition to the cement, Hdjar Soud adds slag cement, to Beni Saf is pozzolan is used as an addition at the end of the cement is no added Msila. Mineralogical and microscopic study showed that the four cements (Msila, Hdjar-Soud, Mefteh and Beni Saf) meet the standards for the cement industry.

### 7.5.15 (p) Etude Gîtologique de Boukdema, Nord-est de Sétif (Algérie)

Nabyl Bouchilaoune<sup>1,2</sup>, Houria Abderrahmane<sup>3</sup>, Abdelhak Boutaleb<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Agence du Service Géologique de l'Algérie, Alger, Algérie

<sup>2</sup>Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie

<sup>3</sup>Laboratoire de Métallogénie et Magmatisme de l'Algérie, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Algérie

Le Djebel Guergour représente une unité des formations sud-sétifiennes faisant partie de la chaîne alpine d'Algérie orientale.

Le district minier de Guergour apparaît dans les fenêtres tectoniques des Djebels Guergour et Anini qui surgissent sous les nappes telliennes. Il comprend les gîtes de Boukdéma (Kef Gueref, El Maâden et Kef Khenoussa) et les indices d'Ain Khelidj.

Dans le secteur minier de Djebel Guergour apparaissent des minéralisations à Pb-Zn et accessoirement cuivre et barytine. Ces minéralisations

sont encaissées dans les dolomies d'âge liasique et dans les calcaires massifs du Cénomano-Turonien de Ain Khelidj.

Les minéralisations plombo-zincifères de Boukdéma sont stratoïdes, et consistent en des remplissages minéralisés d'espaces ouverts ainsi qu'en des substitutions de l'encaissant, leurs distributions sont capricieuses et discontinues. Le contenu minéralogique est constitué par la pyrite, la sphalérite et la galène. Par endroit la sphalérite peut constituer de véritables petits « nids » massifs et denses ; Les minéraux de gangue sont essentiellement le quartz et la dolomite baroque (saddle dolomite), (A.Boutaleb, 2001).

Les minéralisations cuprifères se présentent en remplissage de petites fractures dans les dolomies liasiques de Boukdéma, et elles affectent aussi les calcaires massifs céno-mano-turonien d'Ain Khelidj. Ces fractures contiennent de la dolomite veinulée, pyrite, arsénopyrite, löllingite, chalcoppyrite, barytine, quartz, cuivre gris, bornite, covellite, des carbonates de cuivre (malachite, azurite), qui rendent ces minéralisations bien visibles en surface.

Les observations macroscopiques et microscopiques de la minéralisation et de son encaissant révèlent l'existence de cinq types de textures principales qui sont : Texture massive, texture veinulée, texture bréchique, texture disséminée et texture zébrée.

### 7.5.16 (p) Etude métallogénique et structurale du gisement aurifère de la montagne d'or, région de Paul Isnard, Guyane française

James Guiraud<sup>1</sup>, Alain Tremblay<sup>1</sup>, Michel Jébrak<sup>1</sup>, Rock Lefrançois<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère, Université du Québec à Montréal, Canada

<sup>2</sup>Columbus Gold Corporation, Vancouver, Canada

En Guyane, le gisement aurifère de la Montagne d'Or (5.37 Moz Au à 1.43 g/t), propriété de Columbus Gold Corporation, est encaissée dans la branche nord de la ceinture de roche verte du Paramaca, à proximité du complexe de tonalite-trondhjemite-granodiorite central de Guyane. Le Paramaca constitue les vestiges d'arcs volcaniques insulaires formés entre 2.18 et 2.13 Ga, accrétés et structurés par l'orogénèse Transamazonienne. Trois phases de déformations sont distinguées, dont une génère des bassins pull-apart au nord. Trois types de gisements aurifères primaires ont été caractérisés dans le Paramaca dont de rares gisements stratiformes précoce et déformés, dans lequel le gisement de la Montagne d'Or semble apparenté. Deux hypothèses génétiques sont considérées, (i) une origine magmatique syn-génétique, et (ii) une origine hydrothermal reliée à la déformation tardive. Nous présenterons un résumé de l'environnement géologique et les caractéristiques principales de la minéralisation, des altérations et de la déformation.

Les observations préliminaires montrent que le gisement de la Montagne d'Or est encaissé dans une séquence volcano-sédimentaire bimodale limitée au sud par une zone de cisaillement senestre majeure. L'ensemble de la séquence à polarité sud est affecté par une schistosité régionale, est-ouest, sub-verticale à tendance Sud et semble définir un pli isoclinal. Les corps minéralisés se composent de pyrite, pyrrhotite et chalcoppyrite et ponctuellement de sphalérite, magnétite et arsénopyrite. La minéralisation sulfurée polyphasée montre des caractères pré- et syn- déformation avec trois faciès distincts avec, (1) des sulfures disséminés stratiforme, (2) des stockwerks de sulfures et (3) des lits de sulfures semi-massifs transposés. L'or visible se présente au sein des zones d'altération chloriteuses ou à proximité des sulfures. D'après les observations préliminaires, un gisement de sulfures massifs volcanogène aurifère métamorphisé est envisagé.

### 7.5.17 (p) Contribution de la géophysique a la cartographie des zones favorables a la presence de minéralisations a plomb et zinc dans la region de Aïn-dez, Saïda, Algérie

Mouloud Idres<sup>1</sup>, Tahar Aïfa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Géophysique, Faculté des Sciences de la Terre, Géographie et Aménagement du Territoire, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie

<sup>2</sup>Géosciences Rennes

Les minéralisations à plomb et zinc du nord-ouest de l'Algérie sont localisées, essentiellement, dans les hauts plateaux. Les plus fortes concentrations d'indices et de gisements qui ont un potentiel économique et une grande extension géographique sont recensées, entre autres, dans la région de Saïda et sont encaissées dans les dolomies du Jurassique. Dans le socle paléozoïque, les zones minéralisées, dont l'extension est modeste, sont généralement de direction NE et sont localisées le long de zones de failles. La zone d'étude, qui appartient aux monts de Saïda, fait partie des hauts plateaux. Pour cartographier les dolomies du Jurassique, qui ont une densité proche de celle du socle mais une susceptibilité magnétique plus faible, nous avons réalisé cette étude basée sur l'utilisation combinée des données gravimétriques et aéromagnétiques. L'interprétation des cartes obtenues à partir 342 mesures gravimétriques a permis de mettre en évidence une anomalie positive de direction générale SW-NE, conforme à la direction du socle dans la région. Cette anomalie qui est limitée en profondeur, par deux discontinuités, indique une structure caractérisée par une forte densité. Cette structure, qui s'approfondit en allant vers le SW, peut être associée soit à une remontée du socle ou à une forte épaisseur de dolomies. Pour différencier entre le socle et la couverture dolomitique, nous avons utilisé les données aéromagnétiques. La carte du champ magnétique réduite au pôle montre une forte anomalie négative allongée dans la direction SE-NW. Située dans la zone où la structure gravimétrique est la plus profonde, elle indiquerait la zone où l'épaisseur de la couverture dolomitique est la plus importante. A travers cette étude, on peut conclure que le centre de la région de Aïn-Dez est caractérisé par un soulèvement du socle de direction SW-NE qui s'approfondit rapidement vers le Sud où il est recouvert par une importante épaisseur dolomitique qui va du SE vers le NW.

### 7.5.18 (p) New Mineralized Occurrences Discovered in the Amizmiz Mining District (Western High Atlas, Morocco) : Implications for mining exploration

Said Ilmen<sup>1</sup>, Abdelkhalek Alansari<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Dynamique de la lithosphère et Genèse des Ressources minérales, département de géologie, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc

The Amizmiz mining district located in the northern flank of the western High Atlas, about 70 km southeast of Marrakech city (Morocco), contains a variety of ore types including intrusion-hosted, skarn, carbonate-replacement and vein-type ore deposits. The geology of the Amizmiz area is known through the exploration and mining activities related to the discovery in 1919 of the W-Mo-Cu Azegour Mine, Zn-Pb-Cu-Ag Assif El Mal Mine in 1920 and Zn-Pb-Ag Erdouz Mine in 1927.

The litho-stratigraphy of the studied area consists of a thick succession of a Lower Cambrian to Ordovician metasedimentary and volcanoclastic sequence overthrust by Jurassic to Cretaceous sedimentary terranes. The

Cambro-Ordovician terranes are intruded by Permian granitoids and by a swarm of rhyolitic dikes.

Regional deformation and metamorphism in the Amizmiz area are related to Hercynian orogeny. Three main phases of Hercynian deformation D1, D2, and D3 are recognized under greenschist metamorphism conditions. The structural mapping of the Amizmiz area shows two major faults directions, striking N70°E and N120°E and related to the Hercynian deformation.

Excepting the Azegour Cu-Mo-W skarn deposit that magmatic control is indisputable; the region contains other (Cu-Pb-Zn-Au-Ag-Bi ...) polymetallic mineralization whose typological definition is ongoing and appears to have a link with the Permian magmatism. It is in this case the deposit of Amensif, including polymetallic Cu-Pb-Zn-(Ag & Au) mineralization hosted in lower Cambrian carbonates and auriferous shear zone of Talat n'Imjjad marked by a metallic association of Au-Cu-Bi-Te-Se affiliated to the magmatic affinity.

In summary, the implementation of these deposits is determined by the juxtaposition of at least two of the three predefined factors. The aim of this study is to propose a model in which we emplaced every type of mineralization discussed in the top in its context and showing the relationship between mineralization and lithology, tectonic and magmatism effects.

### 7.5.19 (p) Etude métallogénique de la minéralisation aurifère de Nassara (SW du Burkina Faso)

Pascal Ouyi<sup>1</sup>, Luc Siebenaller<sup>2</sup>, Seta Naba<sup>1</sup>, Didier Béziat<sup>3</sup>, Stefano Salvi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Ouagadougou, Burkina Faso

<sup>2</sup> GET/IRD, Toulouse

<sup>3</sup> GET, Toulouse

Le gîte aurifère de Nassara au Sud Ouest du Burkina Faso (Craton Ouest-Africain) est situé dans la ceinture de roches vertes birimienne de Boromo, qui présente des structures régionales de tendance générale N-S acquises au cours de l'orogénèse éburnéenne. Localement, sur la zone de relais sur laquelle se situe Nassara ces structures (D2) peuvent être orientés NW-SE et sont recoupées tardivement par des bandes de cisaillement NE-SW de faible amplitude (D3). Les données ASM montrent que la zone de Nassara est liée à un cisaillement transpressif, avec un fluage de la matière vers le SE. Les roches hôtes de la minéralisation aurifère sont des metabasaltes-métaandésites, des pyroclastites et des schistes graphiteux. Le long de ce couloir, les roches sont affectées par une altération hydrothermale à quartz, carbonate, albite, chlorite et pyrite.

La minéralisation aurifère de Nassara est caractérisée par un réseau de veines de quartz *pm* carbonate *pm* albite partiellement ou totalement transposées dans la foliation. Les pyrites minéralisées en or sont disséminées ou disposées le long des plans de foliation à proximité des veines. L'or est intimement lié à la pyrite et très rarement retrouvé sous forme d'or libre dans l'encastement altéré. L'or visible se présente sous forme d'inclusions dans les parties limpides des pyrites et notamment le long des surcroissances riches en As. Les pyrites riches en Au contiennent accessoirement de la galène, monazite, sphalérite, chalcoppyrite, cobaltite-gersdorffite s.s. et du rutile. La finesse de l'or de 857 en moyenne est assez faible. L'étude géochimique par LA-ICPMS met en évidence deux populations de pyrites, une très pauvre en Au « invisible » (Au < 0.1 ppm) et également pauvre en As (As < 1000 ppm) et l'autre nettement plus riche en Au « invisible » (Au > 1 ppm), pouvant parfois présenter des concentrations supérieures à 10 ppm, pour des teneurs en As de plusieurs milliers de ppm.

### 7.5.20 (p) Etude pétrographique et structurale des gisements aurifères de Syama, Tabakoroni et Tellem au Sud du Mali (Afrique de l'Ouest)

Dasso Traoré<sup>1,2</sup>, Luc Siebenaller<sup>3</sup>, Didier Béziat<sup>2</sup>, Stefano Salvi<sup>2</sup>, John Miller<sup>4</sup>, Mamadou Bouaré<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université des sciences, des techniques et des technologies de Bamako, Bamako, Mali

<sup>2</sup> GET, Toulouse

<sup>3</sup> GET/IRD, Toulouse

<sup>4</sup> University of Western Australia, Perth Western Australia, Australie

La ceinture de roches vertes birimienne de Syama (craton Ouest Africain, Sud du Mali) est soumise à plusieurs phases de déformation. La D1Sy accompagne la mise en place des arcs volcaniques formant les ceintures de roches vertes. Plus tardivement cette schistosité est recoupée par des bandes de cisaillement linéaires associées à un raccourcissement globalement E-W marquant la D2Sy. Le couloir de cisaillement de Syama se formerait lors de la D3Sy, une phase compressive NW-SE caractérisée par des bandes de cisaillements sénestres associées à la mise en place de caisses filoniennes de veines de quartz-ankérite dont les épontes sont riches en sulfures minéralisés en Au. Ce type de minéralisation peut être observé dans les trois sites aurifères (Syama, Tellem et Tabakoroni) disposés le long de la ceinture de roches vertes de Syama. Toutefois, seul le gisement de Syama est marqué par une très forte bréchification associée à une phase tardive de déformation (D4Sy). Le réseau de fractures ainsi généré tardivement est très riche en Au et constitue la majeure partie du gisement de Syama alors que l'or dans les gisements de Tellem et Tabakoroni est essentiellement lié aux circulations de fluides associés à la D3Sy.

L'arsénopyrite est fortement concentré dans les niveaux minéralisés à Tabakoroni et Tellem. A Syama, la pyrite est le sulfure majeur. Une intense albitisation et silicification précoce, surimprimée successivement par une forte carbonatation (ankérite) et séritisation (muscovite), caractérise la paragenèse d'altération de la D3Sy au niveau des trois gisements. Les pyrites sont marquées généralement par des zonations, avec au centre une zone riche en inclusion minérales de la roche encaissante et en bordure des zones limpides souvent plus riches en As. L'or se trouve soit sous forme d'inclusions dans les surcroissances des sulfures soit dans les fractures tardives associées à la D4Sy. La phase accessoire dominante qui accompagne l'or est la chalcostibite (CuSbS).

## 7.6 *Colloque de Launay* - Approches innovatrices, analytiques ou expérimentales, dans l'étude des gisements

### Responsables :

- Gleb Pokrovski (GET, Toulouse)  
gleb.pokrovski@get.obs-mip.fr

**Résumé :** Cette session met en avant les récents progrès dans les domaines de la géochimie analytique et de l'expérimentation, appliqués à la compréhension de la formation des gisements. Elle concerne aussi bien les innovations en domaine analytique in-situ englobant notamment la géochronologie, que la modélisation de la géochimie des solutions.

### 7.6.1 (o) Datation des formations magmatiques du district Ag-Hg de Zgounder : nouvel indice de l'existence d'un pic métallogénique au néoprotérozoïque supérieur

Ewan Pelleter<sup>1,6</sup>, Alain Cheilletz<sup>1</sup>, Dominique Gasquet<sup>2</sup>, Abdellah Moutaqi<sup>3</sup>, Mohammed Annich<sup>3</sup>, Quentin Camus<sup>1</sup>, Etienne Deloule<sup>4</sup>, Lofti Ouazzani<sup>5</sup>, Hassan Bounajma<sup>5</sup>, Lahcen Ouchtouban<sup>5</sup>

<sup>1</sup>GéoRessources, Nancy

<sup>2</sup>Laboratoire EDYTEM, Le Bourget du Lac

<sup>3</sup>Office National des Hydrocarbures et des Mines, Rabat, Morocco

<sup>4</sup>CRPG, Nancy

<sup>5</sup>Compagnie Minière de Touissit (CMT), Casablanca, Centre minier de Tighza, Province de Khénifra, Morocco

<sup>6</sup>IFREMER, Plouzané

Des intrusions hypovolcaniques de nature rhyolitique et spatialement associées aux minéralisations Ag-Hg de Zgounder (Anti-Atlas, Maroc) ont fait l'objet de datations U/Pb sur zircons par sonde ionique. Une attention particulière a été apportée à l'étude de zircons riches en uranium fortement altérés. Ces zircons présentent deux phases distinctes l'une magmatique associée à des zonation oscillatoire typique d'une cristallisation à partir d'un liquide silicaté, l'autre hydrothermale identifiable par ces zonations concentriques et recoupant la première le long de fractures. Les datations U/Pb obtenues permettent d'identifier quatre principaux âges : (i) un âge à 815 Ma sur zircon hérité, (ii) un âge à 610 ± 7 Ma et (iii) un âge à 578 ± 4 Ma obtenus sur les zircons magmatiques et (iv) un âge moins précis à 564 ± 15 Ma obtenus sur les zones hydrothermales des zircons riches en uranium. L'étude détaillée des phases hydrothermales indique que leur précipitation pourrait être liée à l'évènement hydrothermal responsable de l'albitisation régionale et de la minéralisation Ag-Hg (Cu-Zn) associée. Ces résultats géochronologiques soulignent l'importance du plutonisme crustal tardi-orogénique du pan-africain. Ils s'inscrivent parfaitement dans l'évolution géodynamique édiacarienne de l'Anti-Atlas et renforcent l'existence d'un pic métallogénique au Néoprotérozoïque.

### 7.6.2 (o) Characterization of rare-element Variscan pegmatite fields : multi-approaches study for new metallogenic guides

Sarah Deveaud<sup>1</sup>, Arnaud Villaros<sup>2</sup>, Eric Gloaguen<sup>1</sup>, Romain Millot<sup>1</sup>, Yannick Branquet<sup>2</sup>, Charles Gumiaux<sup>2</sup>, Laurent Guillou-Frottier<sup>1</sup>, Michel Pichavant<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>ISTO, Orléans

Rare-element pegmatite fields mainly enriched in Li-Nb and Ta are subject to increasing mining exploration in the last few years. Indeed, Nb and Ta are more and more employed in design of high-tech applications whereas Li from pegmatite deposits is recognized to be less sensitive to supply disruptions than Li from brine deposits. Thus, new metallogenic guides need to be defined to meet growing demand for Li, Nb and Ta metals and to ensure supply of strategic metals at European scale. Two Variscan rare-element pegmatite fields have been selected to apply a multi-approaches study in order to understand their distribution and their genesis. Firstly, three methods have been developed on the Monts d'Ambazac pegmatite field (Haute-Vienne, French Massif Central) : i) spatial statistical analysis to constrain the spatial distribution of these deposits, ii) Li-isotopic analysis in micas to constrain the genesis relationships between different pegmatite types and iii) U/Pb geochronological approach to discriminate temporal relationships between pegmatites and surrounding granites. Secondly, the Forcarei-Lalin pegmatite

field (Galice, Spain) has been selected to constrain spatial and temporal relationships between pegmatites and hosting-rocks with a structural field study and U/Pb geochronology on Colombo-tantalite crystals. The results demonstrate the main role of tectonic context during pegmatite emplacement and secondly, the role of chemistry and rheology of hosting-rocks on pegmatite differentiation type and on their morphology based on field observations. On the other hand, these two pegmatite fields seem to result from direct crustal anatexis and not from a classical granitic differentiation. To refine this hypothesis, preliminary numerical models have been developed to first, constrain the ascent of pegmatitic melt from a deeper crustal source with respect to their physico-chemical properties and second, to investigate the role of tectonic constraints during their emplacement on the pegmatite field 2D- distribution.

### 7.6.3 (o) Contraintes expérimentales sur la lacune de composition tantalite-tapiolite dans les pegmatites

Marieke Van Lichtervelde<sup>1</sup>, François Holtz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Institut de Minéralogie Hanovre, Allemagne

La manganotantalite MnTa<sub>2</sub>O<sub>6</sub> et la ferrotapiolite FeTa<sub>2</sub>O<sub>6</sub> sont des minerais de tantale souvent associés dans les pegmatites granitiques. La lacune de composition qui existe entre les deux minéraux de Ta est bien contrainte à partir d'exemples naturels, et il existe quelques études expérimentales sur le rôle de la pression et de la température sur cette lacune. Par contre, ces expériences ont été conduites dans des conditions qui ne sont pas représentatives des systèmes naturels (conditions sèches, températures élevées, pression atmosphérique...). Dans notre étude, la lacune de composition tantalite-tapiolite est étudiée au travers d'expériences en cristallisation à partir de magmas pegmatitiques légèrement peralumineux, riches en fluants (Li-F-P) et saturés en eau, et dopés avec différentes proportions de Ta/(Nb+Ta) (Ta\*) et Mn/(Fe+Mn) (Mn\*). Nous avons étudié les paramètres suivants : pression (100 à 200 Mpa), température (700 à 1000°C), fO<sub>2</sub> (NNO à MQF+4) et contenu en éléments mineurs (Ti, Nb) de la tantalite-tapiolite. Les produits expérimentaux montrent des verres homogènes englobant des cristaux de manganotantalite et/ou ferrotapiolite. La taille des cristaux varie de 2 µm à 700°C à 20 µm à 1000°C. La composition des tantalites et tapiolites associées reportée dans le quadrilatère de la colombo-tantalite révèle une lacune de composition fortement décalée vers le pôle Mn\* en comparaison de celle observée dans les associations naturelles. Les résultats préliminaires montrent que la température ne modifie pas l'étendue de la lacune, alors que des pressions plus basses et la présence de Ti dans les minéraux de Ta décalent la lacune vers le pôle Fe\*. Si ces résultats sont vérifiés par des expériences complémentaires, la lacune de composition tantalite-tapiolite pourrait être utilisée comme géobaromètre pour les minéralisations en tantale dans les pegmatites granitiques.

### 7.6.4 (o) Ce distribution and oxidation state in a lateritic profile from Madagascar

Emilie Janots<sup>1</sup>, Fabrice Brunet<sup>1</sup>, Manuel Munoz<sup>1</sup>, Felix Bernier<sup>1</sup>, Alfons Berger<sup>2</sup>, Martine Lanson<sup>1</sup>, Nicolas Trcera<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>Uni. Bern, Suisse

<sup>3</sup>Soleil synchrotron, Gif-sur-Yvette

Despite of relatively low rare earth element (REE) concentrations, laterites are attractive as REE ion-adsorption deposit because REE are sorbed on mineral surfaces (readily leached) and HREE are enriched in

comparison to LREE. However, in laterites, the REE distribution is difficult to assess due to the small size of the host phases and their low REE concentrations. We present here an innovative approach to determine the Ce distribution and oxidation state in a laterite by combining geochemical data with in-situ high-resolution characterization techniques including FE-SEM, EMP and spectrometric measurements using synchrotron radiation ( $\mu$ XANES and  $\mu$ XRF; LUCIA beamline at SOLEIL, France). The lateritic profile (Madagascar) develops over a tonalite and can be simply decomposed from bottom to top : (1) a saprolite (C-horizon) with no significant REE mass transfer, (2) an accumulation zone (B-horizon) where REE and particularly Ce are enriched compared to the bedrock and (3) the top of the profile (A-horizon) where REE are leached out. High REE concentrations are found in REE-phosphates that correspond to the rhabdophane group and minerals of the alunite supergroup in the saprolite and soil (B- and A-horizons), respectively. Cerianite only occurs in the B-horizon. In-situ spectrometric measurements using synchrotron radiation reveals heterogeneous Ce distribution in the B-horizon, where maximum Ce concentrations are found in porous Mn-rich domains. XANES spectra in the LIII edge of Ce reveal unexpected results concerning Ce oxidation state in lateritic minerals. Remarkably, the CeIII/CeIV ratio of secondary rhabdophane minerals in pores and cracks of the saprolite, is identical to that of the parent rock, indicating for no significant CeIII/CeIV fractionation during alteration of primary minerals, transport in altering fluid and secondary mineral precipitation. In clayey material (A- and B-horizons), CeIII/CeIV value (around 100%) indicates that primary CeIV was reduced during leaching of the soil. Subsequent water run off (during the dry season) caused water evaporation and oxidation and precipitation of redox sensitive elements in pores. This scenario accounts for the oxidation/scavenging of CeIII in CeIV and consequent Ce enrichment in the pores associated with Mn-oxides in the accumulation B-horizon.

### 7.6.5 *Keynote communication* : Microscopie IR associée aux analyses ICP-MS par ablation laser - nouvelle approche méthodologique pour l'étude des fluides minéralisateurs piégés dans des minéraux opaques : développements, limites et perspectives

Kalin Kouzmanov<sup>1</sup>, Melissa Ortelli<sup>1</sup>, Vincent Casanova<sup>1</sup>, Bertrand Rottier<sup>1</sup>, Andreas Audétat<sup>2</sup>, Markus Wälle<sup>3</sup>, Nicolas Ubrig<sup>4</sup>, Lluís Fontboté<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Section des sciences de la Terre et de l'environnement, Université de Genève, Suisse

<sup>2</sup>Bayerisches Geoinstitut, Universität Bayreuth, Allemagne

<sup>3</sup>Institute of Isotope Geochemistry and Mineral Resources, ETH Zurich, Suisse

<sup>4</sup>Département de Physique de la Matière Condensée, Genève, Suisse

La démarche classique utilisée pour l'étude des inclusions fluides en métallogénie est limitée par la nécessité de faire l'hypothèse que les minéraux de gangue (transparents), utilisés pour ces analyses, et les minéraux économiques (opaques) associés sont cogénétiques. Combiner l'utilisation de la microscopie et la microthermométrie en lumière infrarouge proche (IRP) avec des analyses ICP-MS par ablation laser (LA-ICP-MS) sur des inclusions fluides piégées dans des minéraux économiques permet d'avancer considérablement dans l'analyse des fluides crustaux responsables de la précipitation des métaux dans les gisements hydrothermaux. La combinaison de ces techniques permet d'analyser individuellement des inclusions fluides piégées dans les minéraux qui restent opaques en lumière visible mais transparents en lumière IRP (e.g., pyrite, énarigite, stibine, ferberite, sphalérite riche en Fe).

Dans cette communication nous présentons les premiers résultats systématiques obtenus sur des associations naturelles de minéraux de gangue et métalliques (quartz-pyrite, quartz-énarigite, quartz-sphalérite, quartz-wolframite, quartz-stibine). Les minéraux analysés proviennent d'environnements hydrothermaux différents afin de mieux évaluer l'application potentielle de la méthode dans une gamme de température allant de 180° à 380°C. Les données présentées montrent une différence dans la source et/ou la composition des fluides responsables de leurs précipitations. En parallèle, les résultats obtenus sur des inclusions fluides synthétiques dans les mêmes associations minérales indiquent que sous conditions contrôlées les paramètres P-T-X enregistrés sont identiques. Cette approche analytique a été appliquée avec succès dans l'étude des fluides minéralisateurs de quelques gisements de la famille « porphyre-épithermale » - Butte (USA), Madan (Bulgarie), Morococha, Colquijirca et Cerro de Pasco (Pérou), Rosia Poieni (Roumanie).

### 7.6.6 (o) Rôle du CO<sub>2</sub> dans les transferts de métaux d'intérêt économique par les fluides géologiques

Maria Kokh<sup>1</sup>, Gleb Pokrovski<sup>1</sup>, Damien Guillaume<sup>1</sup>, Stefano Salvi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

Le CO<sub>2</sub> est le 2<sup>ème</sup> composé majeur (après H<sub>2</sub>O) des fluides formant les gisements métallifères hydrothermaux, mais son effet sur le transport et la précipitation des métaux reste très peu connu faute de données expérimentales. Nous avons combiné des expériences de laboratoire et la modélisation thermodynamique pour quantifier le rôle du CO<sub>2</sub> sur la mobilité de divers métaux (Fe, Cu, Au, Mo, Pt, Sn) en conditions hydrothermales. Des mesures de solubilité des principaux minéraux de ces métaux (FeS<sub>2</sub>, CuFeS<sub>2</sub>, Au, MoS<sub>2</sub>, PtS, SnO<sub>2</sub>) ont été effectuées dans un fluide homogène supercritique (H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-S-KCl à 450°C, 600 bar) en autoclave à cellule flexible et dans un système biphasé (H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-S-KCl à 350°C, 140-270 bar) en autoclave à séparation de phase. Ces données ont été interprétées à l'aide d'un modèle basé sur la constante diélectrique du solvant et la spéciation des métaux. Dans le fluide supercritique en équilibre avec pyrite et chalcopryrite, les données montrent que le rapport Cu/Fe diminue de 4 ordres de grandeur lorsque la teneur en CO<sub>2</sub> augmente de 0 à 70 pds%. Ceci est dû à la différence de solvation des espèces dominantes chlorurés du Cu (CuCl<sub>2</sub>-) et du Fe (FeCl<sub>2</sub>) en présence du CO<sub>2</sub>. Cette découverte implique que lors du transport par phase fluide, la présence du CO<sub>2</sub> induit de forts fractionnements des métaux, bien qu'ils soient sous forme de complexes similaires. Pour le cas du système à l'équilibre liquide-vapeur, dans la gamme de CO<sub>2</sub> de 0 à 50 pds% en phase vapeur, les coefficients de partage (K<sub>v/l</sub> - rapport des concentrations de chaque métal dans la vapeur et le liquide) de Mo (complexes hydroxylés), et de Pt et Au (complexes sulfurés) sont constants (K<sub>v/l</sub>(Mo)≈0,1 ; K<sub>v/l</sub>(Pt)≈3 ; K<sub>v/l</sub>(Au)≈0,1), alors que ceux de Fe et Cu (complexes chlorurés) diminuent, respectivement, de 1 à 0,1 et de 0,1 à 0,01. L'effet du CO<sub>2</sub> sur le transport et le fractionnement des métaux est donc contrôlé en grande partie par leur spéciation chimique en phase vapeur, liquide ou supercritique.

### 7.6.7 (o) Liens entre variations isotopiques du $\delta^{98}\text{Mo}$ des molybdénites et processus de minéralisation

Noémie Breillat<sup>1,2</sup>, Catherine Guerrot<sup>1</sup>, Philippe Negrel<sup>1</sup>, Eric Marcoux<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>ISTO, Orléans

De récentes et nombreuses études isotopiques du molybdène (Mo) ont été menées notamment comme outils d'investigation des conditions (paléo-)rédox. Dans le cadre de cette étude nous nous intéressons aux variations de la composition isotopique du Mo des molybdénites (MoS<sub>2</sub>) afin de déterminer si un lien existe entre le type de minéralisation, les processus minéralisateurs, l'âge des occurrences et les variations observées pour le  $\delta^{98}\text{Mo}$ .

Une base de données de  $\delta^{98}\text{Mo}$  des molybdénites a été constituée comprenant 175 échantillons analysés dans le cadre de cette étude et 167 données issues de la littérature. L'âge de ces minéralisations varie de 5 Ma à 2.7 Ga. Différents types d'occurrence sont représentés : granites (n=20), pegmatites (n=80), greisens (n=3), filons périgranitiques (n=9), porphyres (n=133), skarns (n=42), IOGC (n=6), veines polymétalliques (n=2) et fentes alpines (n=15).

Les  $\delta^{98}\text{Mo}$  des molybdénites ont été déterminés par MC-ICP-MS Neptune après dissolution dans de l'eau régale et sur des solutions à 1  $\mu\text{g.g}^{-1}$  de Mo. Le biais de masse a été corrigé par un standard interne de zirconium et par standard-bracketing. Les  $\delta^{98}\text{MoNBS}$  sont normalisés au NIST3134 ( $\delta^{98}\text{MoNBS}(\text{NBS}) = 0\text{‰}$ ) qui est proposé comme standard international pour le Mo. La reproductibilité externe est de 0.07 ‰ (2 $\sigma$ ). L'analyse statistique des données montre que la répartition du  $\delta^{98}\text{MoNBS}$  des MoS<sub>2</sub> tend à suivre une loi normale. Les moyennes des  $\delta^{98}\text{MoNBS}$  sont plus élevées pour les fentes alpines, les greisens et les veines périgranitiques que pour les skarns, granites et porphyres. Ces derniers types d'occurrences cristallisent à plus haute température que les précédents. Dans le cas des occurrences liées aux granites : le  $\delta^{98}\text{MoNBS}$  des granites ( $-0.13\text{‰} \pm 0.57$ , n = 20) est plus faible que celui des pegmatites ( $0.23\text{‰} \pm 0.52$ , n = 75) et que celui des veines périgranitiques ( $0.63\text{‰} \pm 0.38$ , n = 9). Ceci pourrait montrer une influence de la température sur le fractionnement isotopique du Mo.

### 7.6.8 (o) LA-ICPMS investigation of base and precious metal contents in sulfide minerals from the Troodos ophiolite, Cyprus : Implications for the cycle of metals during hydrothermal alteration of oceanic crust

Sébastien Jégo<sup>1</sup>, Michel Pichavant<sup>1</sup>, Gabriel Coelho<sup>1</sup>, Claire Ramboz<sup>1</sup>, Stanislas Sizaret<sup>1</sup>, Laurent Arbaret<sup>1</sup>, Yannick Branquet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

The Troodos ophiolite (Cyprus) is considered as one of the best-preserved ophiolite complexes in the world, and hosts numerous VMS deposits formed through leaching of metals during hydrothermal alteration of the sheeted dike complex. A recent study (Jowitt et al., 2012) suggests that Cu was totally lost during the early stages of alteration owing to complete breakdown of primary igneous sulfides, whereas the release of other base metals (Ni, Zn, Mn, Co) towards mineralizing fluids was controlled by the secondary mineral assemblage (epidote + chlorite  $\pm$  amphibole). We propose to test this hypothesis by providing measurements of the metal contents of sulfide minerals contained in various lithologies from the Troodos ophiolite. We report laser-ablation ICPMS analyses of 14 base and precious metals (Ti, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Zr, Mo, Ag, W, Pt, Au, and Pb) in sulfides present in samples representative of different stratigraphic levels and chronological stages of the hydrothermal alteration. Preliminary results show a large variability of metal concentration and behavior depending on the lithology. Igneous sulfides present in least-altered metabasalts are notably enriched in Co, Ti, Cu, Pb, Mn and Ag. They likely contain most of the bulk metal budget of the primary magmas. Importantly, numerous sulfides are still preserved in the epidotized sheeted dike complex, and remain enriched in Co, Ti, Pb, Mn (while Cu and Ag appear to have been mobilized). The sulfide-bearing quartz veins corresponding to the discharge

zone show very low metal concentrations, with the exception of Ni, Pb and Cu. Finally, the massive sulfide deposits are made of Cu-, Zn-, and Co-rich pyrite and Pb-, Mo-, Zn- (and Ti-) rich chalcopyrite. These observations suggest that sulfides may play a significant role in controlling the progressive release of some metals during the different steps of hydrothermal alteration, and need to be considered in conjunction with the secondary silicate minerals.

### 7.6.9 (o) L'ion S<sup>3-</sup> serait-il responsable des fortes solubilités de l'or dans les fluides hydrothermaux ? Approche expérimentale et thermodynamique

Damien Guillaume<sup>1</sup>, Marie-Christine Boiron<sup>2</sup>, Nicolas Jacquemet<sup>1</sup>, Chantal Peiffert<sup>2</sup>, Gleb Pokrovski<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>GeoRessources, Nancy

Bien que de nombreuses évidences montrent que le soufre contrôle le comportement de l'or dans les fluides et les liquides silicatés à haute température et pression, les formes du soufre capables de solubiliser et transporter l'or et les réelles concentrations d'or dans les fluides minéralisateurs restent encore peu documentées. La plupart des modèles métallo-géniques postulent que seulement quelques ppm (voire 100s ppb) d'Or dans la phase fluide seraient suffisants pour former un gisement économique. Cependant, les processus de concentration massive de l'or à partir de tels fluides relativement pauvres en Au demeurent énigmatique faute de données sur la solubilité et la spéciation de l'or dans ces systèmes souvent très riches en soufre. Pour répondre à ces questionnements, nous avons réalisé des expériences à 600-700°C et 2 kbar pour piéger le fluide hydrothermal sous forme d'inclusions fluides dans des cristaux de quartz, en considérant le système modèle H<sub>2</sub>O-(Na,KCl)-(Na,K)S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-S-NaOH (teneur en S total  $\sim 3\%$  pds, teneur en sel jusqu'à 20 % pds, pH  $\sim 3-8$ ) à l'équilibre avec l'or métal. Les inclusions synthétisées ont été analysées par spectroscopie Raman in situ jusqu'à 500°C pour étudier la spéciation du soufre, et par ablation laser-ICPMS pour mesurer la concentration totale en Au.

Les spectres Raman de la phase fluide aqueuse des inclusions montrent qu'à l'équilibre au-dessus de 300°C les formes majeures du soufre sont le sulfate, le sulfure et l'ion S<sup>3-</sup>, confirmant ainsi la stabilité croissante de S<sup>3-</sup> avec la température. Les concentrations en Au des inclusions fluides mesurées par LA-ICPMS atteignent 1000 à 3000 ppm aux pH neutres (6-7). Ces valeurs sont de 2 à 3 ordres de grandeurs supérieures aux prévisions thermodynamiques de la solubilité de Au en utilisant les propriétés des espèces sulfurées ou chlorurées d'Or bien connues dans la littérature (AuHS, AuHS(H<sub>2</sub>S), Au(HS)<sub>2</sub><sup>-</sup>, AuCl<sub>2</sub><sup>-</sup>) et qui sont supposées être dominantes dans ces fluides. Ce désaccord frappant entre mesures et prédictions pourrait être expliqué par la formation de complexes solubles entre Au<sup>+</sup> et S<sup>3-</sup>, inconnues jusqu'à présent. De tels complexes pourraient également rendre compte des solubilités en Au dans les fluides (> 600°C) mesurées dans des travaux antérieurs. Ainsi, l'ion S<sup>3-</sup>, ignoré jusqu'à récemment dans les fluides géologiques, peut jouer un rôle crucial dans le transport massif de Au et la formation des concentrations aurifères.

### 7.6.10 (o) Which sulfur species control the mobility of gold in crustal fluids ? Insights from first-principles atomistic simulations

Volker Haigis<sup>1</sup>, Romain Jonchière<sup>2</sup>, Guillaume Ferlat<sup>2</sup>, Ari P. Seitsonen<sup>3</sup>, A. Marco Saitta<sup>2</sup>, Rodolphe Vuilleumier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemistry, ENS Paris

<sup>2</sup>IMPMC, Paris

<sup>3</sup>Institut für Chemie der Universität Zürich, Suisse

Sulfur is one of the major ligands of gold in fluids of the Earth's crust and thus has a strong influence on gold solubility and transport to ore deposits. A detailed understanding of these processes requires knowledge as to which of the various known sulfur species are actually available in crustal fluids for complexation with gold. In a recent Raman study, Pokrovski and Dubrovinsky [1] found that S<sup>3-</sup> is a stable species at crustal conditions. It is therefore a candidate as a ligand for gold at the relevant conditions, challenging the view that the sulfide species HS<sup>-</sup> and H<sub>2</sub>S are the predominant complexation partners.

We investigated different gold-sulfur complexes in water, including AuS<sub>3</sub><sup>-</sup>, by first-principles molecular dynamics simulations, based on density functional theory. We compare the extended x-ray absorption fine structure (EXAFS) derived from our simulations to recent experimental data [2], which allows us to identify the experimentally detected species. The geometry and vibrational properties of various solvated gold-sulfur complexes are investigated, and we rationalize them in terms of their electronic structure. Finally, we discuss the influence of redox conditions on the speciation of gold-sulfur complexes as well as their thermodynamic stability.

[1] G. S. Pokrovski and L. S. Dubrovinsky (2011), *Nature* 331, 1052-1054.

[2] G. S. Pokrovski et al. (2009), *Geochim. Cosmochim. Acta* 73, 5406-5427.

### 7.6.11 (o) Sulphur speciation and associated redox processes in sedimentary and metamorphic settings : spectroscopic and isotopic approach

Guillaume Barré<sup>1</sup>, Laurent Truche<sup>1</sup>, Emilie Thomassot<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GeoRessources, Nancy

<sup>2</sup>CRPG, Nancy

Sulfur speciation and associated redox processes play an important role in numerous geological environments impacted by hydrothermal fluid circulations. Fluid inclusions entrapped in minerals during their growth or later alterations are among the only natural evidence of the composition of these fluids. Here, we specially focus on sedimentary and metamorphic environments where different sulphur valences species (+VI to -II) are found, like deep diagenetic geological settings associated with sour gas field, Mississippi Valley type ore deposits or evaporite formations. The presence of native sulfur and/or the co-existence of dissolved sulfate-sulfide species are often observed at room temperature in H<sub>2</sub>O-rich fluid inclusions formed in these environments. This apparent thermodynamic contradiction implies either that other sulfur species of intermediate valence state are stable under hydrothermal condition or that chemical equilibrium is not attained between reduced and oxidized aqueous sulfur species. Therefore, it is necessary to determine the sulfur speciation and the reaction kinetics between sulfate, sulfide and additional potential reducing agents under relevant PVTX conditions. To address this issue, we perform in situ Raman spectroscopy analysis both on natural fluid inclusions and on synthetic hydrothermal systems using fused silica glass capillary. In both cases the samples were heated step-by-step using a dedicated microthermometric stage coupled with the spectrometer to reproduced as close as possible natural conditions. We reveal the presence of multiple intermediate valence state sulfur species, including S<sup>3-</sup>, and we demonstrate their impact on redox process affecting the sulfur speciation such as thermochemical sulfate reduction.

In addition, we perform sulfur multi-isotopic analysis on S-bearing phases (sulfide, sulfate, organic materials) associated with the selected

fluid inclusions. The measured isotopic fractionations allow us to decipher the origin of the mineralizing fluid and to discuss the geological processes that have occurred in these environments.

### 7.6.12 (p) Application of cathodoluminescence total and spectral imaging to ore geology

Jean-Marc Baele<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Mons, Belgique

Cathodoluminescence (CL) is a powerful technique for studying ores and associated rocks in combination with classical techniques. This contribution illustrates the use of CL in ore geology through a few case studies. Total CL imaging is efficient in revealing minerals that may difficult to observe in thin-sections such as fluorite, apatite, monazite and xenotime, especially in fine-grained rocks. The CL color and emission peaks allow to evaluate the characteristics of these minerals in terms of trace-elements composition in diverse ore categories such as shales (diagenetic), oolitic ironstones, carbonatites and fenites, sedimentary exhalative, placers). In addition, irradiation haloes induced in quartz are useful to quickly detect rare earth phosphates and uraniferous apatite in quartz-bearing rocks. Spectral imaging of rare earth element activating the CL in these minerals provide further discrimination capability. Other field applications of CL lie in the investigation of quartz and feldspar, which exhibits different emission color in various geological environment and may serve as indicators for these environments. A lot of work, though, is still needed to validate and refine them.

### 7.6.13 (p) Effect of Radium mobility on the U-Pb systematic and age determination of uraninite

Marc Brouand<sup>1</sup>, Etienne Deloule<sup>2</sup>

<sup>1</sup>AREVA Mines, Paris-La Défense

<sup>2</sup>CRPG, Nancy

The U-Pb radio chronometer is commonly used to date the formation of uraninite, a major component of uranium deposit. Uraninite was first used in 1905, when Rutherford determines ages up to 500 Ma in using their He/U ratio, and in 1907 when Boltwood determine the first U-Pb ages (413-535 Ma). During the last decade, in situ U-Pb datation on Uraninite has been developed, either in using « chemical ages » with the determination by EMP of U and Pb contents, either in using « isotopic ages » with the determination of Pb and U isotopic ratios and contents by SIMS, providing a large amount of age from archean up to Cenozoic ages. It is noticeable that the determination of chemical age relies on the assumption that the U-Pb system stay closed over time. This assumption can be supported by many isotopic measurements providing concordant or close to concordance 238U-206Pb and 235U-207Pb ages.

However, during the last year, SIMS U-Pb age determination on Uraninite from the Imouraren (Niger) uranium deposit provides contrasted results. On one hand, samples provide concordant U-Pb ages with an average value of  $99 \pm 2$  Ma. On the other hand, samples provide largely discordant ages, with 207Pb/206Pb ages up to 340 Ma. Duplicated measurements and careful data examination allowed us to discard any common lead contamination as a source of discordance. Therefore we set the in situ measurement of the U series nuclides 238U - 234U - 230Th - 226Ra. The high transmission at high mass resolution of the CRPG-Cameca IMS 1270 ion microprobe allowed us to get significant secondary beam intensities for the smaller isotopes and to determine the activity ratios with a few % precision. These measurements points out that 234U and 230Th are at equilibrium with 238U, when 226Ra may

be largely depleted, up to 50%. This points out that in the geological context of the deposit, hydrothermal fluids may leach Ra. To explain the observed discordant ages, Ra should have been lost during a large amount of time since the deposit formation, suggesting a continuous rock fluid interaction in a stable geological context.

#### 7.6.14 (p) Étude de l'utilisation de chromite détritique à l'exploration de minéralisation sulfurée de Ni-Cu au Muremera, Burundi

David Evans<sup>1,2</sup>, Joël Ntungwanayo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Natural History Museum, London, Royaume-Uni

<sup>2</sup>Carrog Consulting, Geological Consulting, Versailles

<sup>3</sup>Rainbow-Burundi, Bujumbura, Burundi

L'exploration des gisements magmatiques de sulfures de Ni-Cu est souvent entravée par l'ambiguïté dans l'interprétation des anomalies de levés géophysiques. En effet, les sédiments sulfurés ou graphitiques qui sont nécessaires pour conduire à la sursaturation de soufre dans le magma (ce qui conduit à l'accumulation de sulfures de Ni-Cu), peuvent souvent présenter une multitude de fausses anomalies, notamment pour les méthodes électromagnétiques et magnétiques. Une méthode rapide et robuste de vérifier au sol les anomalies est nécessaire afin de prioriser les anomalies provenant des levés électromagnétiques aéroportés.

Nous proposons une méthode utilisant les concentrés de minéraux lourds dans les sédiments fluviale, en mettant l'accent sur l'identification et l'analyse des grains de chromite. Chromite et la magnétite sont souvent résistantes à la forte altération latéritique tropicale et peuvent être transportées dans des lits de cours d'eau, où ils seront concentrés avec d'autres minéraux résistants denses dans des sites de piégeage. La présence de chromite ou de magnétite chromifère est un indicateur quasi-certain de l'existence de roches mafiques-ultramafiques en amont. L'analyse par microsonde électronique de ces chromites détritiques peut fournir des informations supplémentaires pour la hiérarchisation des cibles d'exploration.

Nous avons testé la méthode sur les intrusions mafiques-ultramafiques de Muremera au Burundi. Nous avons recueilli des matériaux d'un affleurement ferrugineux et un sédiment de ruisseau en aval du chapeau de fer. Nous avons confirmé que la chromite et la magnétite chromifère sont présents à la fois dans le chapeau de fer et dans les sédiments des cours d'eau. Des analyses de microsonde indiquent que les compositions des chromites chevauchent le champ de chromite dans la roche-mère et indiquent la présence de sulfures magmatiques minéralisées.

#### 7.6.15 (p) Vecteurs minéralogiques et géochimiques marqueurs de zones minéralisées : Étude du halo d'altération du gisement d'or de Canadian Malartic, Québec

Nicolas Gaillard<sup>1,2</sup>, Stefano Salvi<sup>2</sup>, Didier Béziat<sup>2</sup>, Anthony Williams-Jones<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, McGill University, Canada

<sup>2</sup>GET, Toulouse

Canadian Malartic se situe dans la Sous-Province du Pontiac, immédiatement au Sud de la zone de faille de Cadillac-Larder Lake, qui marque le contact avec la Sous-Province de l'Abitibi. Il représente un exemple majeur de gisement d'or à fort tonnage-faible teneur dans le Sud de la Province du Supérieur. La plupart des gisements d'or de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi sont typiquement associés à des veines

de quartz-carbonates et à une altération à albite-carbonates (type orogénique). Canadian Malartic se distingue de ces gisements de par son altération potassique pervasive (biotite-microcline-pyrite-calcite) et le caractère disséminé de la minéralisation aurifère, principalement dans des intrusions porphyriques de monzodiorite quartzifère et dans les métasédiments adjacents. La minéralisation est également associée au développement de veinules de quartz-biotite-carbonate-microcline-pyrite. Elle prend la forme de corps lenticulaires allongés, contrôlés structuralement par des failles et par des contacts lithologiques. L'altération hydrothermale dans les porphyres de monzodiorite quartzifère s'accompagne de gains de masse en S et K, ainsi que d'une augmentation de la perte au feu, cohérente avec les assemblages minéralogiques observés. La zone minéralisée se distingue par des gains importants en Ag-Te-Bi-Mo-Pb-W. Ces observations sont utilisées pour délimiter l'étendue du halo d'altération autour du gisement et fournir des vecteurs d'exploration. L'intensité de l'altération hydrothermale chute de façon brutale en s'éloignant du gisement (l'altération visible ne s'étend pas à plus de 500 mètres de la bordure Sud de l'open-pit). La biotite constitue un vecteur d'exploration potentiellement important car sa composition montre une augmentation régulière et significative en Mg, Si, F et une diminution en Al depuis les zones distales, non altérées (biotites métamorphiques), vers les zones minéralisées (biotites hydrothermales).

#### 7.6.16 (p) Quelles sont les conditions nécessaires à la formation d'un gisement de taille mondiale? Le cas du gisement Ag-Hg d'Imiter, Anti-Atlas, Maroc

Gilles Levresse<sup>1</sup>, Alain Cheilletz<sup>2</sup>, Dominique Gasquet<sup>3</sup>, Lhou Maacha<sup>4</sup>, Jordi Tritlla<sup>5</sup>, Mohammed Bouabdellah<sup>6</sup>, David Bank<sup>7</sup>, Samir Azizi<sup>8</sup>

<sup>1</sup>Centro de Geociencias, Programa de Geofluidos, Centro de Geociencias UNAM, México, Mexique

<sup>2</sup>Géoressources, Nancy

<sup>3</sup>EDYTEM, Le Bourget du Lac

<sup>4</sup>Reminex Managem, Casablanca, Maroc

<sup>5</sup>Repsol Exploración, Madrid, Espagne

<sup>6</sup>Laboratoire des Gîtes Minéraux, Hydrogéologie & Environnement, Faculté des Sciences, Oujda, Maroc

<sup>7</sup>University of Leeds, School of Earth Sciences, Royaume-Uni

<sup>8</sup>AXMINE Company, rue de Yougoslavie, Marrakech, Maroc

Le gisement d'argent d'Imiter est un gisement de classe mondiale (ca. 10 000 t Ag) situé dans l'Anti-Atlas marocain. La minéralisation argentifère est associée à un événement volcanique d'âge Néoprotérozoïque daté à 550±3Ma (U/Pb sur monozircon, IMS 1270-Nancy), synchrone d'un régime tectonique extensif. L'origine des métaux (Ag-Hg), ligands (sulfures) et des fluides associés a été déterminée au moyen des isotopes du soufre, hélium, rhénium-osmium et inclusions fluides analysés sur les sulfures et les minéraux de la gangue. Les valeurs de d34SCDT pour la minéralisation d'argent s'étalent de -28‰ à -2‰ et sont interprétées comme résultant du dégazage de SO<sub>2</sub> dans les fluides ascendants ainsi que du mélange isotopique entre un réservoir magmatique et les roches encaissantes (black shales). Les rapports isotopiques 187Os/188Os compris entre 0.142 et 0.197 indiquent sans ambiguïté une source mantellique pour l'osmium associé aux minéralisations d'argent. Le rapport isotopique 3He/4He varie de 0.76 à 2.64 Ra. Ces données ainsi que l'absence de 20Ne dans les inclusions fluides analysées suggèrent une origine mantellique pour l'épisode épithermal argentifère. Les études microthermométriques et la caractérisation des halogènes dans les inclusions fluides illustrent l'existence d'un système géothermal pulsatif. La précipitation des métaux se produit grâce à la dégazification des fluides magmatiques ascendants. Nous mettons en évidence les conditions nécessaires au transfert et à la concentration d'un

stock important d'Ag et Hg, à savoir : (1) une source magmatique puissante et pérenne, (2) des drains crustaux qui permettent le transfert des magmas et des fluides vers la superficie, (3) l'existence de pièges lithologiques à forte perméabilité et chimiquement réactifs et (4) un système géothermal scellé ce qui augmente le temps de résidence des fluides et la concentration des métaux.

### 7.6.17 (p) L'ion trisulfure, S<sub>3</sub><sup>-</sup>, contrôle la mobilité de l'or dans les fluids hydrothermaux

Gleb Pokrovski<sup>1</sup>, Maria Kokh<sup>1,2</sup>, Damien Guillaume<sup>1</sup>, Jean-Louis Hazemann<sup>3</sup>, Volker Haigis<sup>4</sup>, Guillaume Ferlat<sup>5</sup>, Rodolphe Vuilleumier<sup>4</sup>, Antonino Marco Saitta<sup>5</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Université Paul Sabatier, Toulouse

<sup>3</sup>Institut Néel, Grenoble

<sup>4</sup>Département de Chimie, ENS Paris

<sup>5</sup>IMPMC, Paris

Malgré les nombreuses évidences que le soufre contrôle le comportement de l'or dans les fluids hydrothermaux-magmatiques, l'identité et la stabilité des complexes aqueux porteurs d'or restent une des énigmes en métallogénie. Depuis plus de 40 ans, le sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S et HS<sup>-</sup>) a été considéré comme étant la forme principale de S transportant l'or en phase fluide, vapeur ou silicate liquide. Différents complexes sulfurés ont donc été proposés, comme AuHS, AuHS(H<sub>2</sub>S), Au(HS)<sub>2</sub><sup>-</sup>, AuHS(H<sub>2</sub>S)<sub>3</sub>, ou encore AuHS(H<sub>2</sub>S)NaCl, pour modéliser la solubilité d'Or dans les fluids de haute température et pression. La découverte récente de l'ion trisulfure, S<sub>3</sub><sup>-</sup>, peut bouleverser ces modèles. Nous avons mesuré, en utilisant la spectroscopie d'absorption de rayons X in situ et le réacteur hydrothermal à cellule flexible, la structure moléculaire et la solubilité d'Or dans les fluids aqueux modèles contenant sulfure, sulfate et S<sub>3</sub><sup>-</sup> aux conditions typiques de la formation des gisements hydrothermaux d'Or (S total=0.1-3 wt%, 200-500°C, 300-1000 bar, pH=2-8). Ces données, couplées à des modélisations de dynamique moléculaire, révèlent la formation de complexes stables entre Au<sup>+</sup> avec S<sub>3</sub><sup>-</sup>, vraisemblablement de stœchiométrie AuHSS<sub>3</sub><sup>-</sup>. Ces espèces sont responsables des fortes solubilités d'Or dans nos systèmes (jusqu'à ~ 3000 ppm) qui sont de 10 à 1000 fois plus élevées que celles prédites en utilisant les données pour les complexes sulfurés connus dans la littérature. Les constantes de stabilité de AuHSS<sub>3</sub><sup>-</sup> déduites de nos mesures suggèrent que le S<sub>3</sub><sup>-</sup> serait le porteur principal d'Or dans les fluids enrichis en soufre (> 0.5 wt% S) qui ont formé les gisements de type porphyre cuprifère et d'or orogénique. Comme la teneur en S<sub>3</sub><sup>-</sup> est très sensible aux variations de température, des teneurs en S, du pH, et des conditions redox, sa formation ou sa destruction lors de l'évolution du fluide détermine en grande partie la distribution et la concentration d'Or à travers la croûte terrestre.

### 7.6.18 (p) Identification and Quantification of Carbonate Species Using Rock-Eval Pyrolysis

Daniel Pillot<sup>1</sup>, Eric Deville<sup>1</sup>, Alain Prinzhofer<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IFP Energies nouvelles, Rueil-Malmaison

<sup>2</sup>IFP Energies nouvelles, Present adress : IPEXCO, Botafogo, Rio de Janeiro, Brésil

We present a new reliable and rapid method to characterise and quantify carbonates in solid samples based on monitoring the CO<sub>2</sub> flux emitted by progressive thermal decomposition of carbonates during a programmed heating. The different peaks of destabilisation allow determining the different types of carbonates present in the analysed sample. The

quantification of each peak gives the respective proportions of these different types of carbonates in the sample. The chosen procedure was done using a standard Rock-Eval 6 pyrolyser, based on calibration characteristic profiles of the most common carbonates in nature. We illustrate the potential of the method by case studies applied on different types of carbonates (notably the carbonate chain associated with the hyperalkaline springs of Oman and dolomitization processes of karstic horizons of the Poitiers area in France). This method should allow different types of application for different disciplines, either academic or industrial.

## 7.7 *Colloque de Launay* - **Processus de formation et types de gisements métallifères**

### Responsables :

- Michel Jébrak (UQAM, Montréal, Canada)  
jebrak.michel@uqam.ca
- Gaston Giuliani (GET, Toulouse et CRPG, Nancy)  
giuliani@crpg.cnrs-nancy.fr

**Résumé :** Cette session très générale permettra de recueillir toutes les contributions autres que celles traitées dans les deux premières sessions. Il sera abordé dans cette session les questions classiques posées en Métallogénie : contexte dynamique, genèse et distribution spatio-temporelle des ressources minérales, source, transport et dépôt des métaux.

### 7.7.1 (o) Evaluating the role of hydrothermal transport of rare-metals : insights from a peralkaline granite-related skarn in the Ambohimirahavavy complex, Madagascar

Guillaume Estrade<sup>1</sup>, Stefano Salvi<sup>1</sup>, Didier Béziat<sup>1</sup>, Anthony Williams-Jones<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Montreal, Canada

In the western world there is considerable impetus to discover new resources of rare metals (RM), i.e., REE, Zr, Y, Nb, etc. One of the principal hosts of RM deposits are peralkaline igneous intrusions. To date, there is no consensus on the mode of formation of these deposits, a key issue being whether hydrothermal processes favour economic concentrations. The Ambohimirahavavy complex hosts a rare case of HFSE-rich skarn, which offers an important opportunity to evaluate the role of hydrothermal processes on RM mineralization without having to separate it from the effects of precursor igneous concentration. The skarn forms at the contact of dykes and veinlets of peralkaline granite with the calcareous host. In addition to typical skarn minerals, aegirine and fluorite are important in the endoskarn and exoskarn, respectively, and form a fringe at the contact between the two. In the endoskarn, mineralization occurs as pseudomorphs of mostly zircon plus Nb-pyroxene, REE-fluorocarbonates, quartz, calcite after aegirine. REE-fluorocarbonates are abundant in the exoskarn, particularly in the fringe. A fluid inclusion assemblage (FIA) occurs in quartz, calcite and diopside consists of co-existing vapor-filled and highly saline solid-bearing FI, and represents an unmixed fluid of likely orthomagmatic origin. RM-bearing phases and fluorite were identified in opened FI by SEM.

The above textural and FI evidence indicate that the RM were mobile during skarn formation. We propose that the REE were transported as Cl complexes (Williams-Jones et al. 2012, Elements) in the fluid exsolved from the granite and deposited due to the sharp increase in pH that accompanied interaction of the fluid with the marble. Presence of fluorite is consistent with the fluid interacting with a source of Ca. Other RM such as Zr were probably transported to a less extent, as they do not occur in the exoskarn.

### 7.7.2 (o) Les minéralisations niobifères du complexe alcalin de Crevier (Québec)

Pierre-Arthur Groulier<sup>1</sup>, Daniel Ohnenstetter<sup>1</sup>, Anne-Sylvie André-Mayer<sup>1</sup>, Armin Zeh<sup>2</sup>, A. Moukhsil<sup>2</sup>, F. Solgadi<sup>2</sup>, A. El Basbas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GeoRessources, Nancy

<sup>2</sup>Petrologie und Geochemie, Goethe Universität, Francfort, Allemagne

<sup>3</sup>Ministère des ressources naturelles du Québec, Québec, Canada

Localisée au nord du Lac Saint-Jean dans la province de Grenville au Québec, l'intrusion alcaline de Crevier, est située sur le linéament crustal de Waswanipi-Saguenay. Cette intrusion est voisine de celle minéralisée de la mine Niobec à Saint-Honoré.

Cette intrusion est constituée de trois grandes unités : (i) une unité principale correspondant à une syénite néphélinique massive de texture variable, (ii) une syénite rubanée constituée par le recoupement de dykes de syénite néphélinique, de syénite à biotite, de syénite à biotite-carbonates, de carbonatites et de lamprophyres et (iii) d'un essaim de dykes de syénite néphélinique pegmatitique. Les chronologies relatives observées sur le terrain montrent que la première unité est intrudée par la seconde, les essaims de dykes pegmatitiques recoupant les deux premières unités. Les dykes pegmatitiques se situent au centre du complexe et sont orientés N320°. Les carbonatites sont légèrement postérieures

aux pegmatites et résultent d'une immiscibilité entre liquide carbonatique et liquide silicaté, ces deux liquides sont intrusifs dans la partie aplitique des pegmatites. Les datations de cette intrusion, réalisées par la méthode U-Pb sur zircon du faciès principal de syénite néphélinique, donnent un âge tardi-grenvillien (957,5±2,9 Ma).

Les dykes pegmatitiques représentent le potentiel économique en Nb de ce système intrusif avec une minéralisation exprimée sous forme de fluorocalciopyroxènes et fluoronatropyroxènes. Cette étude a fait ressortir l'existence de deux lignées de pyroxènes issues du processus de cristallisation fractionnée : une lignée à Nb-Ti dominant et une lignée plus tantalifère associée aux phases plus tardives.

### 7.7.3 (o) Rare Earth Elements in Europe and Greenland : A synthesis of lithospheric and anthropospheric potentials

Johann Tuduri<sup>1</sup>, Nicolas Charles<sup>1</sup>, Dominique Guyonnet<sup>1</sup>, Olivier Pourret<sup>2</sup>, Alain Rollat<sup>3</sup>, Victoire Escalon<sup>4</sup>, Mariane Planchon<sup>4</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais

<sup>3</sup>Solvay group, La Rochelle

<sup>4</sup>BIO by Deloitte, Neuilly sur Seine

Given their importance for clean energy technologies, rare earth elements (REE) are central to the energy transition in Europe. Due to stress on global markets, related in particular to the situation of Chinese monopoly, the EU-28 now consider certain REEs as critical for the development of new technologies for "carbon-free" energy generation. In response, EU-28 are developing and diversifying their supply sources, with new mining projects located outside China and efforts in the area of REE recycling. An effective supply diversification plan should consider both primary and secondary sources of REEs.

This study proposes a synthetic map of over 370 REE occurrences and deposit-types in continental Europe and Greenland, based on a global geological and metallogenic review. Most significant REE occurrences are related to the geological history of the Baltic shield and Greenland, with alkaline intrusions and carbonatites providing a huge potential (e.g. Lovozero, Norra Kärr in the Baltic shield, and the Ilímaussaq alkaline complex in South Greenland). Elsewhere in Europe, REE occurrences are relatively ubiquitous albeit of modest importance and appear in a wide variety of geodynamic settings (e.g. palaeoplacers, karstic-bauxites, REE-related to Ba-F veins ...). Moreover, in the Baltic shield, other REE-occurrences are to be considered as by-products within non-conventional deposit-types (e.g. iron-apatite Kiruna, skarns). However, progress in the understanding of the REE ore forming processes is required to help better guide exploration and make new discoveries.

Material Flow Analysis (MFA) has been also used to study in particular the flows and stocks in the EU-27 anthroposphere of selected REEs for which there is a true recycling potential (for the year 2010). If MFAs for Tb and Nd illustrate a real potential for recycling, geologic data show that if just one large exploration project outside China enters production, the criticality issue will be significantly influenced.

### 7.7.4 (o) L'or associé aux intrusions alcalines tardi-archéennes. Exemple de la mine Lac Bachelor, Abitibi, Canada

Noémie Fayol<sup>1</sup>, Michel Jébrak<sup>1</sup>, Lyal Harris<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada

<sup>2</sup>Institut National de la Recherche Scientifique - Centre Eau Terre Environnement, Canada

Des gisements d'or associés à des intrusions alcalines récentes ont été reconnus à travers le monde (ex. : Cripple Creek, Ladolam). Des gisements tardi-archéen sont également présents dans la Province du Supérieur au Canada. Le gisement d'or du Lac Bachelor en Abitibi québécoise en est un exemple clé. Il est situé dans le corridor de déformation régional Wedding-Lamarck (NE-SO) contenant des bassins « type Timiskaming ».

La minéralisation aurifère est située en bordure du pluton O'Brien, une syénite à quartz polyphasée intrusive dans des andésites et des tufs néo-archéens. Les faciès équigranulaires et porphyriques principaux sont recoupés par des aplites de composition similaire représentant les derniers événements magmatiques. La minéralogie du pluton est caractérisée par l'abondance de feldspaths sodiques et potassiques et en plus faible proportion de quartz et biotite/chlorite. De la fluorine violette est également présente, soit disséminée dans la syénite soit dans des veines de Qz-FI-Py-(Au) comagmatiques subhorizontales se prolongeant dans les tufs encaissants.

Une forte zonalité apparaît depuis le cœur du système vers la périphérie ; dans l'intrusion et les roches encaissantes au contact, apparaissent des faciès porphyriques caractérisés par des stockwerks de veines de Mt, Qz, Qz-FI-Py-(Au). L'essentiel de l'or est en association avec des sulfures et oxydes de fer disséminés (Py, Mt, Hm, rare Po et Cpy) dans des zones intensément métasomatisées (Hm-Cb) ; les fluides auraient empruntés des discontinuités préexistantes dans les volcanites, en bordure de la syénite. L'étude des isotopes  $^{18}O$  et  $^2D$  des veines de quartz indique une source magmatique aussi bien pour les faciès porphyriques que pour les veines plus distales dans les zones métasomatisées.

L'évènement hydrothermal minéralisateur est donc lié au magmatisme alcalin. Le système minéralisé du gisement Lac Bachelor illustre donc les rôles complémentaires des évènements structuraux et magmatiques tardi-archéens.

### 7.7.5 (o) Métallogénie de la transition calco-alcalin / alcalin, de la fin de l'Archéen à aujourd'hui

Michel Jébrak<sup>1</sup>, Eric Marcoux<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada

<sup>2</sup>OSUC/ISTO, Orléans

L'évolution tardive des orogènes de subduction est marquée par une large variation de la composition des plutons, reflétant la diversité des zones de fusion partielle de la croûte et du manteau sous-lithosphérique et de leur interactions. On y observe une transition rapide calco-alcalin/alcalin auxquels sont associés de nombreuses minéralisations en or depuis l'Archéen à l'actuel. Une comparaison est ici proposée entre systèmes Archéens et Néogènes.

Dans la ceinture néo-archéenne de l'Abitibi, la transition se situe entre 2685 et 2675 Ma, durant la formation des bassins clastiques du Temiskaming. De petits plutons à caractère de sanukitoïde et alcalin sont associés à de vastes corridors de déformation transtensive, hérités des déformations antérieures. Les premières concentrations en or apparaissent précocement associées au refroidissement des intrusions ainsi qu'aux premiers sédiments. Elles sont réactivées par les différents systèmes hydrothermaux carbo-hydriques qui déposent les gisements filoniens orogéniques.

En Méditerranée occidentale, la transition se situe entre 16-15 Ma, et depuis 6 Ma. Le magmatisme calco-alcalin migre dans l'espace et dans le temps dans le bassin ouest-Méditerranéen. Une remontée rapide du bâti est associée à la formation de structure en transtension et en extension, des périodes d'inversion des contraintes, et produit une sédimentation clastique à caractère molassique dans des bassins intramontagneux. Des minéralisations en or et argent épithermales ont été reconnues tout autour du bassin. Les importants dégagements carbo-hydriques

actuels marquent notamment des zones de failles réactivées, à l'image des minéralisations orogéniques dans des orogènes plus anciens.

La transition calco-alcalin/alcalin reflète dans les deux cas l'évolution d'un système en subduction vers un effondrement orogénique témoin d'une rupture de la plaque plongeante, avec une modification du gradient géothermique. Les systèmes magmatiques et hydrothermaux néo-archéens marqueraient l'émergence d'une tectonique wilsonienne qui se poursuit aujourd'hui.

### 7.7.6 (o) Multi-scale controls of subduction dynamics on the development of ore deposits and magmatism in the eastern Mediterranean

Armel Menant<sup>1,2</sup>, Laurent Jolivet<sup>2,1</sup>, Pietro Sternai<sup>1,2</sup>, Laurent Guillou-Frottier<sup>1,2</sup>, Taras Gerya<sup>3</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>ISTO, Orléans

<sup>3</sup>ETH Zurich, Suisse

Spatial and temporal evolution of subduction-related ore deposits and magmatism is intimately controlled by the 3D geometry and dynamics of the subducting slab. Understanding these relations is therefore fundamental for large-scale prospection.

In this work, we propose new kinematic reconstructions of the eastern Mediterranean region during subduction along the Tethyan margin, which take into account the distribution of magmatic products and mineralization in space and time. Two metallogenic periods were identified. (1) From late Cretaceous to lower Paleocene, calc-alkaline magmatism and porphyry Cu deposits emplaced in the Balkans, along a long linear cordillera. (2) Since the Oligocene, Au-rich deposits and related K-rich magmatism emplaced in a back-arc extensional context during a fast slab retreat episode. Back-arc extension and associated rising of the isotherms seems to have induced the partial melting of the lithospheric mantle or the base of the crust, where Au was previously stored. Emplacement at shallow level of this mineralization was then largely controlled by large-scale structures such as detachments that drained the magmatic-hydrothermal fluids.

Besides a general southward migration of this magmatic-hydrothermal activity since the late Cretaceous, a secondary westward migration is observed during the Miocene from the Menderes massif to the Cyclades. We propose this secondary migration to be related to slab tearing event and associated mantle flow below western Anatolia. We tested the effects of slab retreat and tearing on the flow and temperature field within the mantle, by means of 3D high-resolution thermo-mechanical numerical models. Results suggest that the asthenospheric flow induced by the retreat of a torn slab controls the progressive lateral replacement of crustal-derived molten materials by mantle-derived magmatic products at the base of the stretched crust, affecting the distribution of potentially fertile magmas in the upper crust.

### 7.7.7 (o) Les minéralisations en métaux de base et précieux de la caldera miocène littorale d'El Aouana (Algérie), marqueurs d'une dynamique volcanique littorale

Abdelhafid Afalfiz<sup>1,2</sup>, Michel Jébrak<sup>3</sup>, Nessrine Seghir<sup>2</sup>, Ahmed Semchaoui<sup>2</sup>, Tarek Zerouki<sup>2</sup>, Jean-Marc Regnault<sup>4</sup>, Hakim Haimadi<sup>2</sup>, Antony Greenish<sup>4</sup>, Patrick De Saint-Simon<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Université des Sciences et Techniques Houari Boumediene, Alger, Algérie

<sup>2</sup>SARL Faièneries Algériennes, Alger, Algérie

<sup>3</sup>Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada

<sup>4</sup>TGM SAS, Lyon

Le bassin de la Méditerranée occidentale s'est refermé au Néogène. Sa fermeture s'est accompagné d'un abondant volcanisme calco-alcalin à alcalin connu en Espagne, en Italie, et dans tout le Maghreb. Un grand nombre de minéralisations intrusives, exhalatives et épithermales leur est associé tel que Rodalquilar (Au-Ag), Meilla-Nador (Fe), Oued Amizour et Oued El Kebir (Cu, Zn, Ag, Au), Cap de Fer (Fe), Nefza (Pb-Zn), et Futei (Ag-Au). L'âge du volcanisme et des minéralisations reflète la migration du magmatisme entre 20 et 1 Ma. La caldera d'El Aouana (Petite Kabylie) présente un diamètre de 8 km, ourlé par des roches intrusives calco-alcalines d'affinité adakitique. Le remplissage de la caldera débute par les faciès volcanoclastiques felsiques sub-aériens de Bou Soufa, associés à des dômes porphyriques. Elle passe ensuite à des niveaux sédimentaires lenticulaires qui marquent une invasion marine, en relation avec l'effondrement du plancher de la caldera. Des coulées massives et des pyroclastiques andésitiques sous-marines de la série de Port Maria recouvrent le tout en discordance. La caldeira montre un stade d'évolution mature avec un basculement asymétrique de son plancher. L'effondrement contrôle l'hydrothermalisme comme dans la caldeira actuelle de Nemrut (Turquie).

Les minéralisations d'Oued El Kebir et de Bou Soufa sont connues depuis l'antiquité et ont fait l'objet de petites exploitations et de reconnaissances au 20<sup>ème</sup> siècle. Elles sont à nouveau explorées. Elles sont associées à la transition entre environnement continental et marin. A la base, les roches de la série de Bou Soufa sont fortement hydrothermalisées (altération argilique, séricitique et propylitique). Plusieurs styles de minéralisations coexistent depuis des stockwerks et des remplacements à métaux précieux de type acid-sulfate proches des dômes jusqu'à des niveaux exhalatifs à Pb-Zn-Cu-Ag qui témoignent de conditions hydrothermales à pH neutre. La paragenèse comprend en outre des minéraux d'arsenic, de tellure et d'antimoine et de la barytine. La région d'El Aouana montre donc un cas exceptionnel d'interactions entre dynamique volcanique et littorale où les fluides hydrothermaux sont neutralisés par l'effondrement de la caldera et l'invasissement marin.

### 7.7.8 (o) Caractéristiques lithologiques, structurales et minéralogiques des minéralisations à Cu-Pb-Zn-Ag-Au d'Amensif (Haut Atlas Occidental, Maroc)

Said Ilmen<sup>1</sup>, Abdelkhalek Alansari<sup>1</sup>, Amine Bajddi<sup>2</sup>, Lhou Maacha<sup>2</sup>, Aomar Ennaciri<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Dynamique de la Lithosphère et Genèse des Ressources Minérales et Énergétiques, Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc

<sup>2</sup> Holding Minier de Managem, Casablanca, Maroc

Les altérations hydrothermales ayant affectées les formations volcano-carbonatées du Cambrien inférieur d'Amensif (Haut Atlas occidental) sont en relations mutuelles avec la genèse des minéralisations polymétalliques à Cu, Pb, Zn, Ag et Au. Ces minéralisations s'organisent sous deux typologies distinctes ; une minéralisation filonienne contrôlée par le jeu des failles NE-SW hercyniennes et une minéralisation systématiquement contrôlée par les réactions entre les fluides hydrothermaux et les carbonates encaissantes. Ces minéralisations sont affiliées au type *Carbonate-Replacement deposit* caractérisée par les relations intimes entre les altérations hydrothermales et les minéralisations. L'assemblage minéralogique est composé de chalcopyrite, sphalérite, galène, pyrite, arsénopyrite et cuivre gris. Les relations texturales entre ces minéraux permettent de distinguer deux stades paragenétiques distincts ; (i) un stade arséno-ferrière ; et (ii) un stade polymétallique. Des données préliminaires acquises sur les isotopes du plomb suggèrent que la source des métaux est probablement à rechercher dans formations cambro-ordoviciennes du Haut Atlas occidental.

### 7.7.9 (o) Etude des Minéralisations Liées aux Roches Magmatiques d'Oued Amizour (Béjaia)

Houria Abderrahmane<sup>1</sup>, Hanafi Benali<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculté des Sciences de la Terre, Géographie et Aménagement du Territoire. (FSTGAT). Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene (usthb), Algérie.

Le massif volcano-plutonique d'Oued Amizour fait partie des roches magmatiques tertiaires du pourtour méditerranéen ou plus précisément des Maghrébides. Il se situe entre deux grands domaines géologiques du Nord algérien. Le domaine interne au Nord représenté par le socle kabyle et les flyschs allochtones et le domaine externe au Sud, représenté par les unités telliennes. Ce massif éruptif recèle un potentiel très important en ressources minérales.

Le complexe magmatique d'Oued Amizour présente une minéralisation polymétallique (Zn-Pb) et une autre sous forme de dépôts pyriteux. Ces deux types de minéralisations sont rencontrés dans tous les secteurs du complexe à l'exception d'Amadène où la minéralisation est fissurale et à cuivre essentiellement.

L'étude pétrographique a montré que ce massif est constitué de deux faciès : un faciès plutonique (granitoïdes) et un autre volcanique (andésites, dacites et pyroclastites). L'ensemble de ces roches est affecté par d'intenses altérations hydrothermales qui sont : l'albitisation, la chloritisation, la séricitisation, la silicification, la carbonatation et la kaolinisation. La chloritisation et la séricitisation sont les principaux phénomènes hydrothermaux et ils affectent essentiellement les zones minéralisées.

Le faciès volcanique comprend deux assises volcaniques (inférieure et supérieure) séparées par des métagmatites ou dacites (décrites sous le terme de rhyolitoïdes par Semroud (1981)). La minéralisation principale polymétallique constitue un amas sulfuré (Zn-Pb) d'une épaisseur de 40m à 300m et de pendage modéré vers le Sud. Cet amas minéralisé est encaissé dans les andésites de l'assise inférieure, parfois dans les dacites (métagmatites) silicifiées et séricitisées.

L'étude microscopique des sections polies révèle qu'il s'agit d'une minéralisation sulfurée avec une paragenèse relativement simple à : pyrite, sphalérite, galène, marcassite, magnétite, chalcopyrite et à cuivre gris. Les minéraux secondaires sont représentés par la césurite, l'hématite et la goéthite. Les minéralisations du massif d'Oued Amizour sont caractérisées par différentes textures, on retrouve : la texture massive, la texture disséminée, la texture veinulée, la texture collomorphe et la texture bréchique.

### 7.7.10 (o) Shear-hosted lode-gold mineralization in paleoproterozoic greenstone belt terranes of northern Kordofan (north Sudan)

Laurent Ciancaleoni<sup>1</sup>, Julien Baumard<sup>1</sup>, Rémi Bosc<sup>1</sup>, Julien Feneyrol<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Arethuse Geology SARL, Aix en Provence

In the Neoproterozoic low-grade volcano-sedimentary belt of Umm Badr (Northern Kordofan state, North Sudan), a tens of km wide prominent shear corridor system extends for more than 50 km along strike. The greenschist facies shear zones inside the corridor host mesothermal gold-bearing quartz veins and exhibit a mixed brittle-ductile style of deformation. This study focuses on one of these shear zones, the N-S to N020° striking Zarafi shear zone.

Two types of contemporaneous mineralized veins and veinlets occur in the Zarafi shear zone : (i) major steep shear veins emplaced in the core of the shear zone, concordantly with the shear foliation ; (ii) minor gently dipping hybrid extensional veins, cross-cutting the steep shear

foliation. The steep shear veins, mined up to 80m depth by the artisans, are typically stepped, >100m long and <2m wide, and have various geometries (boudinaged, tabular, brecciated, lens-shaped). The gently dipping hybrid extensional veins, more rarely observed due to outcropping conditions, constitute sets of superposed veins that are generally < 50cm thick.

While the hydrothermally altered and intensively sheared wall rock (felsic intrusives and felsic volcanics) is poorly mineralized, medium to high-grade gold mineralization (up to 200 g/t) is commonly associated with both types of ore veins. Pyrite, chalcopyrite and minor galena and malachite are the typical sulfide phases associated with the gold-bearing quartz veins, with secondary Fe-oxides and sericite. In both vein types, gold and sulfides are very irregularly distributed.

Both veins and the host shear zone were formed during the same progressive non-coaxial simple shear deformation. The steep veins were produced at various stages of the deformation history, by filling of dilatant bends and jogs created by undulations of foliation and slip planes irregularities during shear displacements. Stress permutations between the principal stress axes, during the same long lasting Neoproterozoic transpressive deformation event may soundly explain the structural control of the different types of veins.

At the regional scale, the veins also occupy depositional sites that are the regional foliation and subsidiary brittle-ductile structures related to the main shear zones. The mineralized shear zone/fracture pattern was controlled by the orientation of the strain ellipsoid during the deformation event.

### 7.7.11 (o) Linking shear-zone induced pressure fluctuations to pyrite textures and Au mineralization : An example from the El Callao mining district (Venezuela)

Stefano Salvi<sup>1</sup>, German Velasquez<sup>2</sup>, Luc Siebenaller<sup>3</sup>, Didier Béziat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Universidad Central de Venezuela, Instituto de Ciencias de la Tierra, Caracas, Venezuela

<sup>3</sup>GET/IRD, Toulouse

Orogenic gold deposits form at late stages of the deformational-metamorphic-magmatic history of an evolving orogeny (e.g., Groves et al. 2003), syn-kinematically with at least one main deformation stage of the host rocks. Almost systematically, CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O fluids are involved and most authors agree that fluid unmixing plays a key role on mineralization. It is suggested that this unmixing could be related to a pressure drop within a fault zone (e.g., Sibson 2004), relating fault-fracture mesh development and Au-mineralization. We report the evidence of such pressure fluctuations through structural and fluid inclusions analysis of a gold deposit, and suggest a mineralization process consistent with the fault-valve mechanism proposed by Sibson.

The El Callao gold deposit consists of a shear fracture-hosted ankerite-quartz-albite vein mesh enclosing altered metabasalt fragments. In these, pyrite crystals precipitated during early alteration and contain visible and invisible gold. During later recurrent deformation events, opening of pressure shadows induced multiple overgrowths to develop around these pyrites, which also contain visible and invisible gold (Velásquez et al. 2014). These sequences were accompanied by ankerite-quartz-muscovite precipitation. A high-salinity H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> fluid inclusion assemblage (FIA) occurs in the vein network. Here, as well as in the pressure shadows, is a second FIA of coexisting low-salinity gas-filled CO<sub>2</sub> FI and liquid-rich high-salinity H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> FI.

During pressure shadow formations, the sudden drop in pressure triggered fluid immiscibility (FIA-2), which caused gold precipitation in pyrite overgrowths. Their high number as well as FI data are consistent

with cyclic pressure variations. This led us to conclude that the ductile-brittle transition was not a continuous pathway (Sibson, 2004 and refs. therein), rather, several repetitions of decrease-increase in pressure, which resulted in multiple episodes of gold precipitation.

### 7.7.12 (o) Minéralisations aurifères des roches vertes archéennes de l'Abitibi : Caractéristiques métallogéniques des minéralisations de la Faille Cadillac - Focus sur la propriété Wasamac, Québec, Canada

Nicolas Mériaud<sup>1</sup>, Michel Jébrak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada

Avec plus de 4 200 tonnes d'or et 72 gisements d'or, dont 37 de plus de 10 tonnes d'or et 4 gisements géants (>100 tAu), la faille Cadillac-Larder Lake est une des structures archéennes les plus fertiles au monde. Sur 250km, cette faille est hôte de plusieurs types d'altérations et de minéralisations aurifères au sein desquelles ont été identifiés des champs métallogéniques selon des critères structuraux et métallogéniques. Les minéralisations en or sont associées à trois types de pièges : (1) veines à quartz-carbonate +/- tourmaline, (2) failles ductile-cassantes en cisaillement et (3) veines et porphyres tous deux associés à des intrusions syénitiques. Le champ métallogénique de Rouyn-Noranda, situé à l'ouest de la portion Québécoise de la sous province de l'Abitibi, est caractérisé par des minéralisations aurifères associées à des intrusions albitiques localement liées à des failles ductiles cassantes, comme au gisement Wasamac.

Le gisement Wasamac est associé une faille en cisaillement d'échelle kilométrique et de second ordre, satellite à la Faille Cadillac-Larder Lake, affectant des unités volcaniques archéennes felsiques à mafiques. Le cisaillement Wasamac est de type ductile cassant, suivant une direction et un pendage similaires à ceux de la Faille Cadillac-Larder Lake. La faille peut présenter une puissance supérieure à 100m et est caractérisée par une mylonite intensément métasomatée. La minéralisation aurifère associée au métasomatisme est en remplacement, disséminée dans la mylonite.

Deux types de minéralisations aurifères et d'altérations distinctes associées ont été identifiées et présentent une zonalité selon la section longitudinale du cisaillement Wasamac : (1) Des dykes potassiques rouge vif affectant les unités volcaniques au centre du cisaillement, minéralisés en partie sous forme de tellurures d'or et (2) Une altération albitique majoritaire, présente de part et d'autre de l'altération potassique concentrant de l'or natif uniquement.

L'organisation spatiale de cette zonation et la séquence des alterations suggèrent que la minéralisation Wasamac est le résultat de deux événements hydrothermaux. L'altération potassique serait d'origine magmatique et présente des similitudes avec les minéralisations associées à des intrusions alcalines, l'altération albitique serait quant à elle le résultat de processus minéralisants de plus basse température.

### 7.7.13 (o) Origine des minéralisations de fluorine de la bordure sud-est du Bassin de Paris (Morvan, France)

Morgane Gigoux<sup>1,2</sup>, Benjamin Brigaud<sup>1</sup>, Guillaume Delpech<sup>1</sup>, Maurice Pagel<sup>1</sup>, Catherine Guerrot<sup>2</sup>, Setareh Rad<sup>2</sup>, Thierry Augé<sup>2</sup>, Philippe Negrel<sup>2</sup>, Philippe Chevremont<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université Paris Sud, Orsay

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

L'étude concerne quatre gisements de fluorine spatialement liés à une discordance socle/couverture (Pierre-Perthuis, Marigny-sur-Yonne, Courcelles-Frémy et Antully) et trois gîtes localisés dans le Morvan. Les séquences paragenétiques détaillées de chaque gisement ont été mises en évidence et les observations en cathodoluminescence montrent des zones de croissance et des motifs caractéristiques pour chaque génération de fluorine (F11, F12, F13) associées à d'autres phases minérales (baryte, sphalérite, galène, pyrite, calcite, azurite, malachite, quartz). Les analyses géochimiques des éléments traces (ICP-MS et LA-ICP-MS) ont permis de caractériser les différentes générations de fluorine. Des différences existent dans les concentrations moyennes en éléments des terres rares entre les gisements mais un profil bien cloché caractérise les cristaux de fluorine de ce type de gisement. Une datation Sm-Nd sur les cristaux de la dernière génération de fluorine F13 de Pierre-Perthuis indique un âge de  $130 \pm 11$  Ma, soit au cours du Crétacé inférieur. L'étude des inclusions fluides à Pierre-Perthuis (F13) indique des températures d'homogénéisation variant entre 80-100°C, tout comme à Courcelles-Frémy. Des températures différentes et très variables de 90 à 280°C sont enregistrées à Antully. Les salinités les plus élevées ont été mesurées à Pierre-Perthuis, plus faibles à Courcelles et très variables à Antully. Ces variabilités suggèrent un mélange entre plusieurs fluides. Des données d'isotopes stables de l'oxygène sur les différentes générations de quartz et de baryte associées aux minéralisations de fluorine révèlent la nature météorique des fluides à l'origine des silicifications à basse température. De plus, les signatures isotopiques du strontium sont incompatibles avec une signature d'eau de mer. L'intégration de l'ensemble des données avec l'histoire thermique du bassin de Paris montre qu'un événement de circulation de fluides chauds et profonds doit être envisagé.

### 7.7.14 (o) Métallogénie du germanium dans les gisements plomb zinc : l'exemple de MVT d'Amérique du Nord

Julien Bonnet<sup>1</sup>, Régine Mosser-Ruck<sup>1</sup>, Anne-Sylvie André-Mayer<sup>1</sup>,  
 Jean Cauzid<sup>1</sup>, Laurent Bailly<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Géoressources, Nancy

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

Les gisements de type Mississippi Valley Type (MVT) du centre et de l'est du Tennessee, respectivement MTM (Middle Tennessee Mine) et ETM (East Tennessee Mine), renferment des réserves importantes de zinc sous forme de sphalérite, mais aussi de germanium en substitution du zinc dans la sphalérite dans les mines du centre. Ces deux districts, observés dans les mêmes formations géologiques et de minéralogies comparables, sont comparés afin de comprendre la distribution du germanium et des autres éléments traces dans les MVT. Les analyses par microsonde électronique et par LA-ICP-MS ont mis en évidence deux associations d'éléments traces en substitution du zinc dans la sphalérite : une première association avec Fe et Cd ; et une autre avec Cu Ga et Ge. Des cartographies d'éléments traces sur des cristaux orientés, coupés perpendiculairement à l'axe 3, ont mis en évidence des directions cristallographiques préférentielles de leur incorporation dans la sphalérite. Cu, Ga, Ge sont préférentiellement incorporé suivant le plan (011), et Fe et Cd suivant le plan (010).

Les signatures isotopiques du plomb des minéralisations des deux districts miniers impliquent des sources des métaux distincts pour les mines de l'est et du centre du Tennessee. A partir d'une étude bibliographique intégrant tous les gisements MVT d'Amérique du Nord, il apparaît que les MVT du centre et de l'est du Tennessee appartiennent à deux grandes provinces MVT différentes : la première qui comprend les gisements du bassin des Appalaches (du Tennessee jusqu'à Terre Neuve) et qui ne contient pas de germanium ; la deuxième, composée des MVT de la Val-

lée du Mississippi et qui présente des teneurs importantes en germanium (>100ppm).

### 7.7.15 (o) Minéralogie et géochimie des minéralisations supergènes d'(hydr)oxydes de manganèse dans le district d'Imini (Maroc)

Augustin Dekoninck<sup>1</sup>, Alain Bernard<sup>2</sup>, Jocelyn Barbarand<sup>3</sup>, Bertrand Saint-Bézar<sup>3</sup>, Yves Missenard<sup>3</sup>, Rémi Leprêtre<sup>3</sup>, Omar Sadiqi<sup>4</sup>,  
 Johan Yans<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Namur, Département de Géologie, Namur, Belgique

<sup>2</sup>Université Libre de Bruxelles, Département des Sciences de la Terre, Bruxelles, Belgique

<sup>3</sup>Université Paris Sud, Département des Sciences de la Terre, Orsay

<sup>4</sup>Université Hassan II, Laboratoire Géosciences, Casablanca - Maroc

Les riches minéralisations manganésifères piégées dans les dolomies céno-mano-turonniennes du district d'Imini (Maroc) présentent une minéralogie composée uniquement d'oxydes et hydroxydes de manganèse : hollandite sensu stricto (BaMn8O16), cryptomélane (KMn8O16), coronadite (PbMn8O16), romanéchite [(H2O,Ba)2Mn5O10] et lithiophorite [(Al,Li)MnO2(OH)2]. Les trois niveaux minéralisés stratabound s'étendent le long d'une bande continue d'environ 25 km suivant une direction WSW-ENE, parallèle à certaines structures tectoniques régionales. Les analyses de diffraction des rayons X, couplées aux analyses géochimiques et de microscopie électronique à balayage, mettent en évidence deux modes minéralisateurs : (1) remplacement progressif de la roche hôte, avec conservation de la texture dolomitique, et (2) cristallisation dans un milieu fracturé et ouvert sous forme de concrétions zonées. La complexité minéralogique reflète le caractère polyphasé des minéralisations qui survient probablement au travers des périodes de karstification et de fracturation. L'absence de précurseurs minéralogiques in situ (carbonates ou silicates de Mn) souligne l'origine allochtone du Mn et des éléments associés (Ba, Pb, K, ...). On observe, en outre, un enrichissement des éléments mobiles dans la roche hôte. Les multiples apports externes de métaux, se traduisant par des variations de composition au sein des concrétions zonées, s'accompliraient au travers d'une dissolution chimique et mécanique in situ de la roche hôte dolomitique marquée par une conservation des profils en terres rares depuis la roche hôte jusqu'aux sédiments de remplissage karstiques. Bien que l'origine des métaux reste incertaine, l'accumulation de Mn dans le district d'Imini s'accorde avec le caractère davantage perméable des dolomies comparativement aux roches adjacentes (basaltes, sables et argiles rouges du Trias ; schistes du Paléozoïque ; rhyolites, granites et diorites du Néoproterozoïque ; alternance de sables argileux, dolomies, évaporites et calcaires du Sénonien). La concentration supergène d'oxydes et hydroxydes de Mn implique des processus karstiques mais aussi un contrôle tectonique s'observant à travers l'aspect bréchifié et le lien entre la bande minéralisée et les structures tectoniques N70°E.

### 7.7.16 (o) Controlling factors of the manganese concentration in the dolostone of Bouarfa (Morocco)

Ludovic Lafforgue<sup>1</sup>, Jocelyn Barbarand<sup>1</sup>, Yves Missenard<sup>1</sup>, Bertrand Saint-Bézar<sup>1</sup>, Johan Yans<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GEOPS, Orsay

<sup>2</sup>Université de Namur, Département de Géologie, Namur, Belgique

The mineralized district of Bouarfa located in the eastern High Atlas (Morocco) consists of stratabound Mn ore deposits hosted in a massive Sinemurian dolostone bank. Modes of formation including geodynamical context and age of formation are still unresolved. Present model suggests a formation during the Sinemurian in connexion with the marine High Atlas basin ; however, the position of the district close to the northern front of the High Atlas questions the role of the Atlas chain building, occurring during Tertiary, in its formation. We propose to challenge this debate using mineralogical, diagenetic, structural and thermochronological data.

Microscopic observations allowed to characterize several Mn oxide generations : pyrolusite, hausmannite, hollandite s.l. and hollandite s.s. , associated with various Fe oxi/hydroxide and calcite phases. This association shows that supergene conditions prevail during Mn oxide formation and are not compatible with marine fluids ; this conclusion will be later strengthened with geochemical analyses. Relationships between Mn oxides and dolomite indicate that the mineralization replaces a burial dolomite that is specific to the Sinemurian dolostone unit. Structural data define the Northern Atlas Front in the Bouarfa district area as a relay zone with anticlines affecting the Mesozoic sedimentary cover and cored by Paleozoic schists. Low temperature thermochronology data confirm that this area has been highly active since the deposition of the Sinemurian unit and that a model where meteoric fluids have been mobilized by gravity (relief) is envisaged.

### 7.7.17 (o) Remobilisation de métaux par des fluides hydrothermaux : le cas des travertins de la région de Takab (NW Iran)

Magali Rossi<sup>1</sup>, Dominique Gasquet<sup>1</sup>, Faranhaz Daliran<sup>2</sup>, Jalil Ghalamghash<sup>3</sup>, Hamid Jafari-Saroughi<sup>3</sup>, Omid Ardebili<sup>3</sup>

<sup>1</sup>EDYTEM, Le Bourget du Lac

<sup>2</sup>Institut of Mineralogy and Geochemistry, University of Karlsruhe, Allemagne

<sup>3</sup>Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

Dans la région de Takab-Angouran (zone métamorphique de Sanandaj-Sirjan, NW de l'Iran), des minéralisations miocènes (10-15 Ma), des travertins quaternaires et des eaux thermales actuelles jalonnent une faille pluri-décakilométrique d'orientation E-W, et de nombreuses autres failles de moindre importance. L'hydrothermalisme est associé à un contexte de fort gradient thermique, résultant d'une activité magmatique (volcanisme Miocène). Les relations spatiales entre gisements métallifères, travertins et sources hydrothermales sont très variables : des travertins fossiles sont associés spatialement aux gisements métallifères (Zn-Pb à Angouran, As-Au à Zarshouran, Au à Agh Dareh) et d'autres, actifs et fossiles, sont situés loin des gisements métallifères (p.ex., le long de la faille de Zendan-Ūe-Soleyman).

Des études pétrographiques et géochimiques (majeurs, traces, REE sur roches totales ; XCore-Scanner sur échantillons) ont été réalisées le long de profils verticaux pour les 4 sites précédemment cités afin de mettre en évidence des enrichissements et des anomalies en métaux. En effet, on observe des niveaux fortement enrichis en Zn et Pb à Angouran et en As à Zarshouran (jusqu'à 1,9 % d'As), ce qui suggère que les fluides hydrothermaux à l'origine des travertins ont été minéralisés et ont remobilisé les métaux des gisements situés à proximité. Les travertins situés à proximité de la mine d'Agh Dareh ne montrent quant à eux aucune anomalie aussi significative, de même que les travertins de Zendan-e-Soleyman, qui sont très pauvres en métaux. Les premiers résultats d'analyses isotopiques (C, O) seront présentés. Ils permettront de discuter et de comparer l'origine des fluides entre les 4 sites étudiés. L'ensemble de ces données traduit la diversité des circulations hydrothermales et témoigne de la juxtaposition et de l'évolution des systèmes

hydrothermaux depuis le Miocène à l'actuel, dans une zone géographique réduite (50 x 20 km).

### 7.7.18 (o) A fluid inclusion and stable isotope study of the world class imiter silver deposit (Morocco)

Claudie Hulin<sup>1</sup>, Michel Dubois<sup>1</sup>, Johann Tuduri<sup>2</sup>, Alain Chauvet<sup>3</sup>, Philippe Boulvais<sup>4</sup>, A. Gaouzi<sup>5</sup>, M. Mouhajir<sup>5</sup>, M. Essalhi<sup>1</sup>, S. Outhoujite<sup>5</sup>

<sup>1</sup>LGCgE, Lille

<sup>2</sup>ENAG, BRGM, Orléans

<sup>3</sup>Géosciences Montpellier

<sup>4</sup>Géosciences Rennes

<sup>5</sup>MANAGEM, Maroc

The Imiter silver mine is a world-class deposit located in the Eastern part of the Anti-Atlas (Morocco). The deposit is hosted by Cryogenian black shales and Ediacaran volcanics, and unconformably overlain by Paleozoic sedimentary rocks. The paragenetic sequence for the gangue mineral is composed by amacrosopically white quartz (Qz1) associated with the deposition of galena and scarce silver minerals as matrix of hydraulic breccias, followed by a grey quartz (Qz2) associated with the main silver deposition event and a first generation of scarce dolomite (Dol1). A third episode is characterized by massive pink dolomite precipitation (Dol2) with minor quartz (Qz3) and base metals. Finally, a surficial event affects the mineralisation and is responsible for a secondary ore enrichment.

Microthermometry study coupled with Raman analyses reveals that fluid inclusions are CaCl<sub>2</sub>-dominated. The general trend is a decrease of temperature from Qz1 (250°C) to Dol1 (80°C) then Dol 2 (probably below 70°C) depositions. Fluid salinity increases from Qz1 (6.3 to 19.0 wt % NaCl<sub>eq</sub>) to Dol1 (27.2 % wt NaCl<sub>eq</sub>), and decreases with the precipitation of Dol2 associated with quartz 3 (15 %wt NaCl<sub>eq</sub>). The δ<sup>18</sup>O isotopic composition of fluids in equilibrium with quartz and dolomite suggests a magmatic, metamorphic and/or basinal origin for the fluid at the origin of Qz1, and that meteoric / surficial basinal brines may be at the origin of Dol2.

The proposed model to explain the ore forming processes in Imiter is a mixing of Ca-brines, probably providing chloride complexes, with a hot NaCl fluid of lower salinity, leading to the precipitation of silver. The results favour the important role of calcic brines, whose origin remains matter to debate in such a giant deposit and for whom age of emplacement is strongly discussed.

### 7.7.19 (o) Géochimie des suites plutoniques différenciées du Nord-Est de la Province du Supérieur (NEPS) : implications tectoniques et métallogéniques

Christophe Azevedo<sup>1</sup>, Michel Jébrak<sup>1</sup>, Andréa Amortegui<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada

<sup>2</sup>Ministère des Ressources naturelles du Québec, Québec, Canada

Le NEPS fait partie des blocs continentaux neoarchéens les plus importants au monde en terme de surface. Il expose majoritairement des roches plutoniques felsiques, principalement des tonalites, des granites, des granodiorites, des charnockites et de rares monzonites et syénites. Cet environnement plutonique marque les premiers stades d'évolution de la croûte continentale durant l'Archéen. Le magmatisme évolue d'un stade primaire sodique (suites de tonalites) à un magmatisme potassique souligné par la mise en place d'unités de granodiorites et de granites

tardi-archéens. Tardivement, des syénites et des carbonatites se mettent en place localement.

La caractérisation métallogénique des suites plutoniques du NEPS passe nécessairement par la réalisation d'une typologie synthétique, en analysant leur distribution, en les comparant avec les données régionales, et en ciblant les secteurs d'intérêts.

L'état d'oxydation des intrusifs granitiques ainsi que leur fractionnement semblent être les principaux facteurs qui contrôlent la genèse de minéralisations économiques. Les minéralisations de types Cu-Au et Cu-Mo se trouvent généralement associées à des intrusifs oxydés et peu fractionnés (série à magnétite). À la différence, les minéralisations de types Sn et Sn-W se trouvent généralement associées aux intrusifs réduits et fractionnés (série à ilménite). Les analyses du fer d'intrusifs différenciés frais du NEPS semblent suggérer un potentiel métallifère favorable pour des minéralisations de types Cu-Au et Cu-Mo. La majeure partie des intrusifs analysés appartient à la série évolutive à magnétite. Cependant, une hétérogénéité en terme d'oxydation et de fractionnement permet de supposer des potentiels ponctuels en minéralisations de types Mo, W et Sn-W (série évolutive à ilménite). L'analyse régionale de ces paramètres (oxydation et fractionnement) ainsi qu'une étude géochimique poussée des plutons semblent donc être une étape indispensable pour faire ressortir de nouvelles zones d'intérêts métallogéniques au sein du NEPS.

### 7.7.20 (o) Nature des fluides et circulations fluides associés au développement d'un endoskarn uranifère (District de CAGE, Québec)

Cyril Durand<sup>1</sup>, Michel Dubois<sup>2</sup>, Sandra Ventalon<sup>3</sup>, Pierre Trap<sup>4</sup>,  
 Philippe Goncalves<sup>4</sup>, Didier Marquer<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Géosystèmes, Lille

<sup>2</sup>LGCgE, Lille

<sup>3</sup>UFR des Sciences de la Terre Université Lille I

<sup>4</sup>Laboratoire Chrono-environnement, Besançon

Le district de CAGE se situe au sein de l'orogène des Torngats. Cet orogène résulte de la collision vers 1.85Ga de deux blocs continentaux : le craton du Nain et la Core Zone, dans la partie NE du bouclier canadien, au Québec. Au niveau du District de CAGE, associé à cet orogène, les séries paradérivées (paragneiss et marbres) et le socle orthodérivé enregistrent un métamorphisme de haut grade atteignant la fusion partielle de certaines formations et la production de liquides crustaux. La mise en place de ces liquides, au-delà du contrôle tectonique régional (structuration en C/S), se fait souvent au contact entre paragneiss et marbres, aboutissant alors à la formation de skarns.

Dans cette étude, nous nous intéressons à l'évolution d'une pegmatite au contact avec un marbre. L'endoskarn qui se développe au sein de la pegmatite renferme des minéralisations uranifères avec le développement d'uraninite. L'endoskarn se caractérise, en comparaison du protolithe magmatique, par la disparition du mica noir et du quartz, l'augmentation du diopside et du feldspath alcalin (qui devient enrichi en baryum) ainsi que par l'apparition de la scapolite (marialite). Concernant les résultats en isotopes stables (C et O) obtenus sur le profil, l'évolution des données isotopiques est caractéristique d'un régime diffusif entre les marbres et la pegmatite. Ceci suggère des transferts de matière limités dans l'espace et donc une origine locale de l'uranium provenant soit des liquides pegmatitiques ou des marbres mais en lien avec les processus de skarnification.

Une analyse préliminaire des inclusions fluides nous a permis de différencier différents types de fluides associés à l'évolution de la pegmatite. Deux types contrastés d'inclusions considérées comme pseudo-secondaires ont été observés : 1/ des inclusions monophasées à CO<sub>2</sub> pur

de densité 0,85 à 1 g/cm<sup>3</sup> et 2/ des inclusions polyphasées à cube de sel (L+V+S). Des inclusions monophasées à CO<sub>2</sub> plus tardives (secondaires) ont également été observées.

### 7.7.21 (o) Histoire magmatique et mobilité élémentaire dans le leucogranite hercynien de Guérande, Massif Armoricaïn : implication sur la minéralisation en U.

Christophe Ballouard<sup>1</sup>, Marc Poujol<sup>1</sup>, Philippe Boulvais<sup>1</sup>, Marc Jolivet<sup>1</sup>, Philippe Boulvais<sup>1</sup>, Romain Tartèse<sup>2</sup>, Julien Mercadier<sup>3</sup>,  
 Michel Cuney<sup>3</sup>, Michel Cathelineau<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

<sup>2</sup>Planetary and Space Sciences, The Open University, Milton Keynes,  
 Royaume-Uni

<sup>3</sup>GeoRessources, Nancy

Dans la chaîne hercynienne, la majorité des minéralisations en uranium est associée aux granites peralumineux tardi-carbonifères (Cuney et al., 1990). C'est le cas dans le Massif Armoricaïn où l'on distingue trois districts uranifères spatialement associés aux leucogranites de Pontivy, Mortagne et Guérande (20% de la production française d'uranium). Le leucogranite de Guérande, mis en place à c.a. 310 Ma (Ballouard et al., cette étude) en contexte extensif (Gapais et al., 1993) dans la zone sud du Massif Armoricaïn, est associée au niveau de sa zone apicale au gisement d'uranium de Pen Ar Ran : un gîte filonien périgranitique situé dans une zone déformée au contact entre des métavolcanites acides et des schistes noirs.

Les données géochimiques récemment acquises sur le granite de Guérande indiquent que son histoire magmatique est contrôlée par un processus de cristallisation fractionnée, et montrent un comportement complexe de l'uranium (U) suggérant deux stages d'évolution : un premier caractérisé par une augmentation de la teneur en U des échantillons et interprété comme magmato-hydrothermal puis un second associé à une baisse de la teneur en U interprété comme reflétant un lessivage des oxydes d'uranium de la zone apicale du granite lors d'une interaction avec des fluides oxydants. L'uranium ainsi lessivé aurait pu alors précipiter dans le milieu réducteur constitué par les schistes noirs environnants pour former le gisement de Pen Ar Ran.

Afin de vérifier ce scénario, des analyses en isotopes stables, inclusions fluides et géochronologiques sur le granite et les minéralisations sont en cours.

Cuney, M., Friedrich, M., Blumenfeld, P., Bourguignon, A., Boiron, M.C., Vignerresse, J.L., Poty, B., 1990. Metallogenesis in the French part of the Variscan orogen. Part I : U pre-concentrations in pre-Variscan and Variscan formations - a comparison with Sn, W and Au. *Tectonophysics* 177, 39-57.

Gapais, D., Lagarde, J.L., Le Corre, C., Audren, C., Jegouzo P., Casas Sainz, A.; Van Den Driessche J., 1993. La zone de cisaillement de Quiberon : témoin d'extension de la chaîne varisque en Bretagne méridionale au Carbonifère. *C. R. de l'Acad. des Sc. de Paris*, t. 316, Série II, 1123-1129.

### 7.7.22 (o) Un exemple de minéralisation à étain-tungstène d'âge fini-namurien dans le Massif Central Français : l'indice à cassitérite-wolframite de St-Mélany (Ardèche)

Matthieu Harlaux<sup>1</sup>, Julien Mercadier<sup>1</sup>, Christian Marignac<sup>1</sup>, Michel Cuney<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GeoRessources, Nancy

Les minéralisations filoniennes péri-batholitiques à  $W \pm Sn$  du Massif Central Français (MCF) sont considérées, soit comme l'expression d'un « événement à W » plus ou moins contemporain de « l'événement Or » à c. 305 Ma (Bouchot et al., 2005), soit comme le produit d'une série d'épisodes étalés sur tout l'événement « néo-varisque » (Marignac & Cuney, 1999). Au niveau de St-Mélany, dans la vallée de la Drobie (Ardèche),affleure un complexe de filons de quartz à muscovite-cassitérite-wolframite encaissés dans des micaschistes mésozonaux de basse pression. Situé à équidistance de deux massifs granitiques hétérochrones (Rocles, c. 315 Ma ; Borne, c. 305 Ma) cet indice permet donc de tester ces deux hypothèses. Une cartographie détaillée montre que le complexe filonien se compose de deux types de filons : (i) De gros filons lenticulaires « plats », qui se reliaient latéralement en restant connectés sur un mode typique de la fracturation hydraulique. Ils sont faiblement obliques sur la schistosité régionale et sont boudinés. (ii) Des filons redressés plus minces qui interconnectent les premiers et sont affectés par un fort aplatissement. L'ensemble filonien s'interprète comme un ancien système de failles inverses et de joints de tension associés, déformé par l'épisode de raccourcissement régional D3 qui est associé au métamorphisme de basse pression. Puisqu'ils recoupent les assemblages métamorphiques et que la minéralisation qu'ils contiennent est elle-même antérieure à l'aplatissement, ces filons doivent donc être considérés comme tardi-D3. Cet événement étant daté à c. 315 Ma, la minéralisation ne saurait être postérieure, et serait donc associée à l'emplacement du granite peralumineux de Rocles. Il se confirme donc qu'il y a plus d'un épisode de minéralisation à Sn-W dans le MCF. Bouchot, V., Ledru, P., Lerouge, C., Lescuyer, J-L., Milesi, J-P., Ore Geology Reviews, 2005, 27, 169-197. Marignac, C., Cuney, M., Miner. Deposita, 1999, 34, 472-504.

### 7.7.23 (o) Activité hydrothermale et minéralisations à W-Sn peri-granitiques : cas du gisement de Maoping (Jiangxi, Chine)

Hélène Legros<sup>1</sup>, Christian Marignac<sup>1</sup>, Julien Mercadier<sup>1</sup>, Antonin Richard<sup>1</sup>, Michel Cuney<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GeoRessources, Nancy

La province de Jiangxi est actuellement le leader mondial dans la production de tungstène. Les minéralisations (wolframite et cassitérite) y sont exprimées sous forme de veines de quartz associées à des intrusions granitiques. Cette étude tend à définir une séquence paragénetique détaillée et une étude d'inclusions fluides dans le cas du gisement de Maoping. Les résultats montrent une mise en place de la minéralisation en trois stades. Le premier est caractérisé par des veines à quartz, topaze, wolframite, cassitérite et micas. L'analyse microthermométrique des inclusions fluides dans le quartz indique une salinité comprise entre 0,1 et 5,2 wt% eq. NaCl et des températures d'homogénéisation ( $L+V \rightarrow L$ ) (Th) entre 174 et 287°C. L'analyse de la phase gazeuse par spectrométrie Raman indique la présence de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>. Dans la topaze, celles-ci ont une salinité et des Th plus élevées (6,2-6,8 wt% eq. NaCl ; 331-345°C), contiennent du CO<sub>2</sub> dans la phase gazeuse et quelques solides (micas). Le second stade est caractérisé par des veines à quartz rubanées, associées à des feldspaths, des micas et des minéraux de terres rares. Le dernier stade est, enfin, caractérisé par des sulfures, associés à des fluorites à phosphates de terres rares. Les données d'inclusions fluides sur les quartz du second stade et les fluorites du dernier stade sont en cours d'acquisition, afin de contraindre la nature et les conditions de circulation des fluides à l'origine de ces deux stades. Néanmoins, les données acquises sont en accord avec les travaux décrits pour ce type de gisements dans la Province de Jiangxi (Wei et al., 2012) ainsi que pour d'autres minéralisations à W-Sn péri-granitiques, au Portugal (Panasqueira ; Kelly et al., 1979) ou en Australie (Mole granite ; Audétat et

al., 1998), et montrent donc que ces gisements présentent des caractéristiques communes pour les fluides qui les ont formés.

Audétat et al., 1998. Formation of a Magmatic-Hydrothermal Ore Deposit : Insights with LA-ICP-MS Analysis of Fluid Inclusions. Science, vol 279, p.2091.

Kelly et al., 1979. Geologic, fluid inclusion and stable isotope studies of the tin-tungsten deposits of Panasqueira, Portugal. Economic Geology, vol 74, n°8, p.1721-1822.

Wei et al., 2012. Infrared microthermometric and stable isotopic study of fluid inclusions in wolframite at the Xihuashan tungsten deposit, Jiangxi province, China. Mineralium Deposita, n°47, p.589-605.

### 7.7.24 (o) Etude minéralogique des concentrations d'étain dans les sulfures hydrothermaux associés à des roches ultrabasiques le long de la dorsale atlantique

Catherine Evrard<sup>1,2</sup>, Yves Fouquet<sup>3</sup>, Yves Moëlo<sup>4</sup>, Emmanuel Rinnert<sup>5</sup>, Joel Etoubleau<sup>1</sup>, Jessica Aimée Langlade<sup>6</sup>

<sup>1</sup>FREMER, Plouzané

<sup>2</sup>Groupement de Recherche Eau Sol Environnement, Limoges

<sup>3</sup>Laboratoire de Géochimie et Métallogénie, Plouzané

<sup>4</sup>Institut des Matériaux Jean Rouxel, Nantes

<sup>5</sup>Laboratoire Détection, Capteurs et Mesures, Plouzané

<sup>6</sup>IUEM, Plouzané

Les sulfures polymétalliques échantillonnés le long de la dorsale atlantique et formés au contact de roches ultrabasiques sont enrichis en Sn comparés aux sulfures hydrothermaux associés à un substrat basaltique. Dans certains échantillons des sites hydrothermaux Ashadze et Logatchev, la concentration globale en Sn peut atteindre 2000 ppm. L'utilisation de l'imagerie à électrons rétrodiffusés au microscope électronique à balayage ainsi que des analyses à la microsonde électronique, ont permis la localisation et la quantification de Sn dans les sulfures de Zn et de Cu. La concentration en Sn peut atteindre 6 %pds dans les sphalérites et 2 %pds dans les chalcopyrites. 8 %pds de Sn ont été mesurés dans les fronts de remplacement de la sphalérite par la chalcopyrite (avec environ 33 %pds S, 20 %pds Cu, 16 %pds Fe, 32 %pds Zn). La spectroscopie Raman suggère que la majorité de l'étain est sous forme de micro-inclusions de stannite dans les sphalérites de haute température. Suite aux études minéralogiques et géochimiques, nous proposons 3 étapes d'évolution de Sn dans ces sulfures hydrothermaux :

- (1) Sn précipite en premier dans les sphalérites de basse température, en tant qu'inclusion dans la matrice ;
- (2) à haute température (300°C) et faible pH (3), la sphalérite est remplacée par la chalcopyrite. Sn, précédemment contenu dans les sphalérites de faible température, contribue alors à la formation d'une solution solide de haute température : sphalérite-stannite-chalcopyrite ;
- (3) finalement Sn est réparti de manière homogène dans la chalcopyrite haute température nouvellement formée.

### 7.7.25 (p) Les gisements aurifères du district Mana, Ceinture de Houndé, Burkina Faso

Jérôme Augustin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UQAC-LAMEQ, Canada

Depuis quelques années, l'Afrique de l'ouest est devenu un secteur d'importance pour l'exploration aurifère grâce à la découverte avec la découverte de nombreux gisements orogéniques de classes mondiales. Ces gisements se retrouvent dans des ceintures de roches vertes d'âge Paléoproterozoïque (2.4-2.0 Ga).

Le district de Mana illustre bien le potentiel aurifère des ceintures birimienne avec la découverte récente de quatre gisements aurifères orogéniques économiques de tailles majeures (0.3 à 4 Moz). Ces gisements se situent dans l'ouest du Burkina Faso, dans la ceinture de Houndé. La géologie de la ceinture, consiste en un cœur volcano-sédimentaire recoupé sur les bordures par des intrusions de la série des TTG. La déformation est polyphasée et forme des failles majeures spatialement associées aux minéralisations.

La spécificité de Mana est que l'on retrouve sur moins de 20 km de circonférence, une grande diversité de gisements aurifères ayant des lithologies, des minéralisations et des déformations variées. Les plus importants gisements (Wona et Siou) se retrouvent sur les bordures de la ceinture avec des minéralisations associées à des filons de quartz ou des zones de silicification, contenant des sulfures et de l'or libre. Les minéralisations suivent des failles crustales en contact avec des granodiorites et des volcano-sédiments. La continuité est kilométrique en lien avec des halos d'altérations à séricite, carbonates de fer et chlorite. Les gisements de plus petites tailles (Fofina et Nyafé) sont encaissés dans le cœur de la ceinture, à la base de la colonne stratigraphie. Les unités consistent en des basaltes tholéitiques formés en domaine de plateau océanique, intercalés par des shales et des wackes. Les minéralisations sont distribuées sur le flanc d'un anticlinal pour Fofina et suivant une faille dextre de 2<sup>ème</sup> ordre pour Nyafé. L'or est associé à l'arsénopyrite et à la pyrite avec des teneurs en or élevées. L'or libre n'a pas été observé.

D'autres indices aurifères comme Yaho et Fobiri, actuellement non ressources, démontrent le potentiel en or de la ceinture de Houndé.

### 7.7.26 (p) Le rôle de la serpentinisation sur les minéralisations cobaltifères et magmatiques (La chromite et les sulfures de Nickel)

Mohamed Bhilisse<sup>1</sup>, Amina Wafik<sup>1</sup>, Hassan Admou<sup>1</sup>, Lhou Maacha<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire dynamique de la lithosphère et genèse des ressources minérales et Energétique, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc

<sup>2</sup>Groupe MANAGEM, Maroc

La serpentinisation est en fonction de la composition des roches ultramafiques magmatiques, le chimisme du fluide et le système ouvert ou fermé du processus. A Bou Azzer, les pyroxènes sont aussi serpentinisés. Les olivines contiennent du nickel et du cobalt à des teneurs respectives de 3900 et 200 ppm. Le fluide est probablement chargé en calcium et en magnésium comme en témoigne les dépôts de la magnésite et des masses de listwénites.

Dans ces conditions, la serpentinisation se serait produite dans un système ouvert avec apport de l'acide carbonique, du calcium et de l'eau. En plus de la serpentine et de la magnétite, ils se forment des carbonates de calcium et de magnésium ainsi que des carbonates de nickel et de cobalt. Le stock en cobalt est finalement reconcentré dans minéraux facilement lixiviables comme la magnétite et les carbonates. L'action des fluides hydrothermaux et l'apport de l'arsenic des sédiments et du soufre des saumures vont conduire à sa reconcentration sous forme d'arséniures, sulfo-arséniures et sulfures.

En ce qui concerne la partie du nickel et du cobalt associés aux sulfures, la serpentinisation a joué un rôle important dans sa redistribution et en concomitance avec la transformation de l'olivine. Généralement, les roches ultra-mafiques non altérées peuvent renfermer des sulfures magmatiques, telles que la pyrrhotite, la pentlandite et la chalcopyrite. Les différences de compositions minéralogiques entre les roches ultra-mafiques non altérées et celles transformées en serpentines suggèrent un contrôle de la minéralogie des sulfures secondaires de Ni-Co-Fe-S par

les réactions chimiques intervenant lors de la serpentinisation. Les assemblages minéraux des sulfures secondaires de ces métaux dépendent du degré de serpentinisation. Une serpentinisation partielle dans laquelle l'olivine est transformée en serpentine, magnétite et pentlandite avec le transfert chimique du contenu en cobalt, nickel et fer. La pyrrhotite primaire et la pentlandite sont transformées en pyrrhotite, mackinawite et la magnétite avec une redistribution des concentrations en fer, soufre, nickel et cobalt. Il est aussi possible que la pyrrhotite secondaire soit monoclinique ou même absente. Dans le cas de Bou Azzer, la serpentinisation est totale et les phases minérales secondaires sont différentes. Elles regroupent la polydymite, la millerite et l'orcélite.

### 7.7.27 (p) Contrôle régional et local des minéralisations et du magmatisme dans le complexe gneissique de Bondy, Province de Grenville, Canada interprétées à partir de données de champ potentiel

Grégory Dufrechou<sup>1</sup>, Lyal Harris<sup>2</sup>, Louise Corriveau<sup>3</sup>, Vladimir Antonoff<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Institut National de la Recherche Scientifique - centre Eau Terre Environnement, Québec, Canada

<sup>3</sup>Natural Resources Canada, Geological Survey of Canada, Québec, Canada

Le complexe gneissique de Bondy, dans la ceinture métasédimentaire centrale au Québec (CMB-Q), est un édifice volcano-plutonique d'arc magmatique contenant un système d'altération hydrothermal métamorphisé de type oxyde de fer cuivre-or (IOCG). Des brèches minéralisées postérieures au métamorphisme sont aussi présentes.

Une récente étude régionale a identifié plusieurs zones de cisaillement senestre d'échelle crustale dans la CMB-Q, dont la zone de cisaillement de Mont-Laurier Sud qui traverse la partie nord du complexe. Cependant la forte couverture végétale, la taille et la distribution sporadique des affleurements n'avaient jusqu'alors pas permis d'identifier cette zone de cisaillement régionale dans le complexe.

Ainsi, pour soutenir l'exploration et améliorer notre compréhension du complexe, un levé gravimétrique et un levé aéromagnétique ont été réalisés. L'interprétation conjointe de ces données couplées à une étude de terrain a permis d'identifier un couloir en décrochement senestre de 6 km de large orienté NO-SE, comprenant plusieurs cisaillements secondaires senestres profonds ( $\geq 1$  km) dont l'expression en surface n'est pas établie. Ce couloir de décrochement est interprété comme la zone de cisaillement de Mont-Laurier Sud et a été active à plusieurs reprises au cours de l'histoire du complexe, permettant :

- (i) la migration des fluides minéralisateurs impliqués dans la formation du système hydrothermal pré-métamorphisme,
- (ii) la mise en place d'intrusions,
- (iii) la formation de zones minéralisées post-métamorphisme dans le complexe gneissique de Bondy.

Un contrôle structural d'échelle crustale sur la formation du système hydrothermal métamorphisé du complexe gneissique de Bondy et un contrôle magmatique sont en accord avec les modèles de formation de gîtes IOCG.

### 7.7.28 (p) Découverte d'une association hydrothermale tardive à P, Nb, Zr, Ti, Y, HREE, W, U dans la pipe bréchique à tungstène de Puy-les-Vignes (Limousin, Massif Central Français)

Matthieu Harlaux<sup>1</sup>, Rémi Magott<sup>2</sup>, Christian Marignac<sup>1</sup>, Michel Cuney<sup>1</sup>, Julien Mercadier<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UMR 7359 GeoRessources Université de Lorraine Faculté des Sciences et Technologies "Entrée 3B" rue Jacques Callot BP 70239 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex France - France

<sup>2</sup> UMR 6249 - Laboratoire Chrono-environnement (UMR 6249 - Laboratoire Chrono-environnement) - Université de Franche-Comté La Bouloie - UFR Sciences et Techniques, 16 route de Gray 25030 Besançon cedex - France

Le gisement de Puy-les-Vignes ( $\geq 5$  kt WO<sub>3</sub>) est un cas quasiment unique en Europe varisque de minéralisation à tungstène dans une pipe bréchique. Située dans le Limousin, la pipe qui recoupe les gneiss migmatitiques de l'Unité Inférieure des Gneiss (UIG), a été interprétée comme une brèche d'effondrement polyphasée (Weppe, 1958) : (i) des fragments des gneiss encaissants et de granite greisenisés sont tourmalinisés, puis cimentés par du quartz ; (ii) l'ensemble est repris par des filons à quartz-wolframite-arsénopyrite, suivi par un épisode de déformation plastique. La minéralisation, datée sur muscovite à  $323,4 \pm 0,9$  Ma (âge plateau 40Ar/39Ar), serait contemporaine de la mise en place du granite d'Auriat et de St Sylvestre (Cuney et al., 2002). L'accès à de nouveaux échantillons a permis la découverte d'une nouvelle association hydrothermale tardive, ciment d'une brèche qui affecte la schéelite déjà déformée, et caractérisée par un assemblage à tourmaline-feldspath potassique-chlorite, où la tourmaline, elle-même bréchifiée, est précoce. Associée au feldspath K, une riche paragenèse de minéraux accessoires comprend zircon, Gd-Dy-xénotime, Nb-W-rutile, dominée par une famille de niobo-titanates à zonation complexe. Ces derniers, riches en Nb, Fe, W, Y, HREE, U et Ca, correspondent à des solutions solides complexes apparemment non-décrites à ce jour, de formule générale  $A1-xB2+x(O,OH)_6$  et comprenant comme pôles purs le rutile (TiTi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>), la columbite (FeNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>), l'aeschynite (YT<sub>2</sub>NbO<sub>6</sub>) et son équivalent théorique à tungstène (FeWTiO<sub>6</sub>), l'uranopolycrase (UTi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) et la vizezzite (CaNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>). Un tel ensemble évoque plus les pegmatites de la famille NYF et les granites à métaux rares peralcalins que le magmatisme peralumineux, jusqu'ici recensé dans le Massif Central Français. Cette découverte ouvre par conséquent des perspectives nouvelles pour la compréhension du magmatisme à métaux rares, et plus généralement, de la métallogénie du W et des métaux associés, dans ce domaine crustal.

Cuney, M., Alexandrov, P., Le Carlier de Veslud, C., Cheilletz, A., Rimbault, L., Ruffet, G., Scaillet, S., 2002, The Timing and Location of Major Ore Deposits in an Evolving Orogen. Geological Society, London, Special Publications, 204, 213-228.

Weppe, M., 1958. Contribution à la géologie minière et à la minéralogie minière. Les gisements de wolfram de Leucamp, Puy les Vignes, Montbelleux, S.I.T., Nancy, 196 p.

### 7.7.29 (p) Structural control on mineralization in the Achmmach tin deposit (Moroccan Central Massif)

Elmahjoub Mahjoubi<sup>1</sup>, Lakhlifi Badra<sup>1</sup>, Alain Chauvet<sup>2</sup>, Stanislas Sizaret<sup>3</sup>, Luc Barbanson<sup>3</sup>, Chen Yan<sup>3</sup>, Abdelkader El Maz<sup>1</sup>, Jeffrey Lindhorst<sup>4</sup>, Pierre Chaponniere<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Université Moulay Ismail, Zitoune, Meknès, Maroc

<sup>2</sup> Géosciences Montpellier  
<sup>3</sup> Université d'Orléans, Orléans  
<sup>4</sup> Kasbah Resources, Perth, Australie

Tin mineralization in Achmmach deposit (NE of Moroccan Central Massif) is associated with tourmaline-rich alteration halos and faults, within N70 shear zones, hosted in sandstones and metapelites of the Upper Visean-Namurian. Such deposits were reported as late-Variscan in age and related to the emplacement of late orogenic granite not outcropping in the studied area.

From field constraints, it appears that the late Variscan phase is marked by a transition from transpression to extension with conditions of deformation evolving from ductile to brittle environments. During the transpressive phase (horizontal shortening direction roughly trending E-W), pervasive tourmaline is deposited under the form of metasomatic halos around fractures in the upper levels relative to the deep batholith. This hydrothermal activity is coeval with ductile shear zones within a large corridors trending N70. Tourmaline-rich alteration appears as a hardening stage contributing to the modification of the tectonic style of rocks. Thereafter, a strong brecciation occurs in response of re-using and re-opening of the strike-slip structure. The result is (1) the formation of dextral (N070, N020) and sinistral (N120) shears, and (2) the circulation of fluids within early tourmalinites and formation of tourmaline-rich breccia. Subsequently, during the late orogenic extensional phase, tourmalinite breccias reopened as normal faults acting as overpressure fluid pathways for developing other breccias and veins. Such event is marked by deposition of tin mineralization i.e., cassiterite followed by sulphides, and then fluorite and carbonates at the end.

From analysis of the shear-zone structure and superimposition of tourmalines and tin mineralization in the same structures, it is possible to suggest a structural control continuum. Such control is well expressed during metasomatism and deposition of hydrothermal tourmaline under the transpressive phase. Thereafter, under the extensive phase allowing open-space, tin-mineralization were trapped.

This study has been supported by AI MA/09/210.

### 7.7.30 (p) Les minéralisations aurifères fins Archéennes associées à la faille Porcupine-Destor ; Abitibi, Québec, Canada

Sacha Lafrance<sup>1</sup>, Michel Jébrak<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada

Les minéralisations aurifères de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi se présentent dans une grande variété de style et de contexte géologique. Dans le district minier de Duparquet (Québec, Canada), les modèles volcanogènes, d'intrusifs felsiques porphyriques (Mine Beattie) et de cisaillements aurifères coexistent le long de la faille Porcupine-Destor. Ce secteur apparaît comme un secteur-clé où les relations entre ces différents modèles peuvent être déchiffrées. Cette étude examine alors les relations entre le gîte d'or de type « orogénique » et les intrusions felsiques porphyriques observées sur le terrain et dans la région.

Le terrain d'étude est localisé au niveau de failles subsidiaires situées immédiatement au nord de la faille régionale Porcupine-Destor. Ces failles décrivent un mouvement dextre et inverse. Elles ont une largeur moyenne de 5 à 10 m. Elles sont généralement orientées 070N à 090N avec un pendage de 75° à 90°.

Les roches du secteur sont majoritairement des volcanites mafiques et comprennent en plus faible proportion des rhyolites et des komatiites. Cet assemblage appartient au groupe de Kijovévus (2718 Ma) et a une signature d'éléments traces typique de contexte d'arc volcanique. On observe de plus des porphyres quartzo-feldspathiques syn-orogéniques (2689 Ma) et des roches volcano-sédimentaires tardi-orogéniques (2700-2687 Ma) de type « Timiskaming ».

Les minéralisations sont présentes au sein de volcanites mafiques cisailées au cœur des failles subsidiaires ductiles-cassantes et en bordure des porphyres quartzo-feldspatiques déformés. L'hydrothermalisme est caractérisé par un essaim de veines de quartz et dolomie ferrifère déformées et par une abondance de séricite et de pyrite pervasive. L'altération illustre un apport de fluides hydrothermaux riches en CO<sub>2</sub>, K et S.

Est-ce que cette minéralisation de type « orogénique » est génétiquement associée aux intrusifs felsiques porphyriques observés sur le terrain ? Se compare-t-elle aux autres coexistences géologiques similaires observées dans d'autres districts miniers tels que celui de Malartic (Québec, Canada) ? Ainsi, les différents éléments montrent que les minéralisations de type orogénique en sont pas.

### 7.7.31 (p) Geologic and metallogenic study of gold mineralization of Bakoudou ore deposit (Gabon)

Amina Wafik<sup>1</sup>, Kalidou Traoré<sup>1</sup>, Ali Saquaque<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculté des Sciences Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc

<sup>2</sup>CMG, Managem Goupe, Twin Center Casablanca

Bakoudou gold deposit, Property of Managem since 2005-2006 is the subject of numerous investigations for different purposes. It is an exploration project but also characterization, the latter being approximated here. This work is part of the study of the Bakoudou (Gabon) gold deposit and its southern extension and joins as a participation in these investigations. To recap, the objective of This study is to determine the type of Bakoudou gold deposit and if possible to present a model of genesis of the deposit.

So to characterize the Bakoudou gold deposit and its South extension, we have undertaken macroscopic petrographic studies approaches of samples of two core drilling (BA06-36 : 13 samples and BH2 : 1 sample) and microscopic polished thin sections of these samples. ICP-MS and X-ray diffraction (XRD) Analysis were performed on samples and geochemical processing of the results of these analyzes is presented to characterize the gold, our main focus. Several conclusions emerge from the results of these studies.

- ICP-MS results indicate that the percentages of SiO<sub>2</sub> for all samples are upper or equal to 52, implying that the facies are supersaturated with silica (intermediate to acid rock). As lithology, microscopic study has concluded that the facies granites, granodiorite or diorite quartzic.

- These rocks have undergone regional metamorphism marked by the appearance of quartz crystals recrystallized, foliation in some rocks and start metamorphic ribbon trimming following by hydrothermal alteration process of low intensity marked by the development of chlorite and sericite.

- The spectra of X-ray diffraction have revealed the particular presence of crossite, a sodic amphibole mineral, tracer of regional metamorphism blueschist facies.

- Petrologic and metallogenic study reveals that gold, our main interest, is disseminated in free grains present in quartz, plagioclase, biotite and amphibole of surround rocks and so abundant in quartz facies, which is consistent with a magmatic origin of the gold. That does not exclude the contribution of hydrothermal because it is shown very lowly in some blades that gold is related to chlorite from hydrothermal origin. Sulphides contained in the blades are low quantities. Part of these latters is related to magmatic origin and a greater amount is related to hydrothermal origin.

### 7.7.32 (p) Données sur de nouveaux gîtes à (Mo) et des gîtes polymétalliques à (Cu, Zn, Fe) (Ag- Au) découverts dans le district minier d'Imiter (Jbel Saghro oriental, Maroc)

Bouchra Baidada<sup>1</sup>, Abdelkhelek Alansari<sup>1</sup>, Said Ilmen<sup>1</sup>, Moha Ikenne<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Dynamique de la lithosphère et Genèse des Ressources minérales, département de géologie, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc

<sup>2</sup>Laboratoire de Pétrologie, Département de géologie, Faculté des Sciences, Agadir, Maroc

Le secteur d'étude est localisé au Sud de la mine d'Imiter dans la boutonnière d'Imiter (Anti- Atlas). Cette dernière est située au Nord Est du Jbel Saghro oriental. Elle est constituée d'un socle Néoproterozoïque PII de nature grésopélitique qui a été structurée, au cours de la phase panafricaine majeure, en un vaste anticlinorium d'axe NE-SW au quel serait associée une schistosité pénétrative de même direction. A l'issue de la cartographie de la zone d'étude et les travaux de terrains effectués, plusieurs indices et gîtes à métaux précieux (Au, Ag), à métaux de base (Cu, Pb, Zn) et à Molybdène ont été répertoriés. L'étude préliminaire nous a permis de distinguer deux types de structures minéralisées : Des structures polymétalliques de direction moyenne N 45° tout au long de Oued Bou-Flio encaissées dans la granodiorite de Boutglimt et d'autres structures à molybdène-quartz de direction Nord-Sud encaissées dans un granite à biotite récemment mis en évidence.

L'étude métallographique des échantillons prélevés, a permis d'identifier l'assemblage minéralogique suivant : chalcopryrite, hématite, molybdénite, magnétite, arsénopyrite, or et une gangue principalement siliceuse avec des venues carbonatées postérieures. Les relations texturales entre les différents minéraux constitutifs, montrent une évolution en deux stades paragénetiques distincts.

Le stade I : arsénopyrite dans une gangue quartzreuse

Le stade II : chalcopryrite- cuivre gris ± l'or dans une gangue quartzo-carbonatée

L'objectif de cette étude consiste à une caractérisation d'un point de vue minéralogique, cartographique, pétrographique et géochimique de la minéralisation à Molybdène, récemment découverte dans la région à fin de la caler dans le contexte géodynamique de la boutonnière d'Imiter.

### 7.7.33 (p) Origin of the pegmatites and associated uranium mineralization from the CAGE province (North Québec)

Jessica Bonhoure<sup>1</sup>, Michel Cuney<sup>2</sup>, Francesca Castorina<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais

<sup>2</sup>GeoRessources, Nancy

<sup>3</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università La Sapienza, Roma, Italie

In the western part of the Torngat Mountains (north Quebec), uranium mineralizations are observed in metasediments, mainly localized in the Lake Harbour group. This group consists of calcitic and dolomitic marbles, paragneisses, quartzites, calc-silicate rocks and metabasalts injected by pegmatites [1].

The pegmatites of the Cage area (north Québec) share similar characteristics as the Rössing alaskite from Namibia, of anatectic origin [2]. The heterogeneity of the geochemical characteristics for these first pegmatites favour a syn-metamorphic model (partial melting) where U enrichment has a magmatic origin (melts and fluids injected in metasediments to form the pegmatites). The Sr data suggest that the pegmatites

were derived from a continental crust partial melting, and a more enriched source for the pT pegmatite than the others.

The carbonate rocks have played the role of chemical barrier, for the crystallization of the pegmatites and trapping of uranium. Among the studied pegmatites, only pT has a within-plate granites signature [3] and it is particularly enriched in U [4]. It clearly comes from a different source (extremely rich in plagioclase) as the other pegmatites with possibly a lower continental crust signature.

[1] Verpaelst et al. (2000). Rapport RG 2000-2 du Ministère des Ressources naturelles du Québec.

[2] Cuney and Kyser (2008). Mineralogical ass. Of Canada, Short Course S. 39, 257 p.

[3] Pearce et al. (1984). J. Petrol., 25, 956-983.

[4] Netto (2010). Thèse de doctorat Université Henri Poincaré, Nancy-1. 202 p.

### 7.7.34 (p) Surimposition de minéralisations plombo-zincifères paléozoïques et mésozoïques dans les Pyrénées axiales : nouvelles données isotopiques sur la minéralisation de Castel-Minier, secteur d'Aulus-les-Bains (Pyrénées)

Adrien Boucher<sup>1</sup>, Marguerite Munoz<sup>1</sup>, Sandrine Baron<sup>2</sup>, Didier Béziat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Laboratoire TRACES, Toulouse

Les Pyrénées axiales contiennent un grand nombre de minéralisations sulfurées plombo-zincifères. A l'exception d'une étude décrivant une minéralisation filonienne à Pb-Zn-F-Ba reliée à une circulation de fluides au Mésozoïque, les minéralisations plombo-zincifères des Pyrénées ont été rapportées au Paléozoïque, la plupart décrites comme étant de type exhalatif-sédimentaire, contenues dans les sédiments métamorphisés du Paléozoïque, et plus particulièrement dans ceux de l'Ordovicien et du Dévonien. En considérant les rapports isotopiques du plomb et en se rapportant à l'isochrone de Sardaigne (modélisée par Ludwig et al., 1989) en accord avec l'existence d'une province isotopique pour le plomb s'étendant sur l'Europe du Sud-Ouest, toutes les données issues de la littérature concordent de-fait avec un âge Paléozoïque.

Dans le secteur d'Aulus-les-Bains, la minéralisation de Castel-Minier est constituée de galène, de sphalérite, de chalcopryrite, de pyrite et de cuivre gris. Elle a été exploitée du XIII<sup>e</sup> au XVI<sup>e</sup> siècle pour son caractère argentifère ; les cuivres gris analysés présentent une concentration en argent entre 2,3 et 3,7% pds et la galène peut atteindre 0,18% pds. Les nouvelles données isotopiques du plomb, acquises sur les galènes présentes dans la minéralisation, se distinguent à l'exception de deux analyses des données de la littérature. En effet le rapport  $(208\text{Pb}/204\text{Pb})=f(206\text{Pb}/204\text{Pb})$  de la minéralisation montre pour la majorité des analyses un caractère plus radiogénique, suggérant ainsi un âge plus récent. En se rapportant à l'isochrone de Sardaigne, cet âge serait Mésozoïque (entre 200 et 250Ma environ). En ce qui concerne les deux analyses qui présentent des valeurs moins radiogéniques, l'une concorde avec les données de la littérature confortant l'existence d'une phase de minéralisation paléozoïque et l'autre est intermédiaire, suggérant ainsi la remobilisation d'une minéralisation paléozoïque par le fluide minéralisateur de l'épisode Mésozoïque.

### 7.7.35 (p) Orthorombically arranged high-purity quartz veins arrays formed in tension in the Mauritanides belt (Umm Ageuina, Mauritania)

Laurent Ciancaleoni<sup>1</sup>, Julien Feneyrol<sup>1</sup>, Mathieu Douceré<sup>1</sup>, Rémi Bosc<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Arethuse Geology SARL, Aix en Provence

High purity quartz refers to material of ultra high SiO<sub>2</sub> purity, generally higher than 99,99%, with total impurities of less than 100 ppm. Quartz veins of such rare high purity occur in the Mauritanides Belt of Mauritania (Umm Ageuina region, northern Mauritanides). This preliminary study is focused on the structural characterization of these high purity quartz veins. The quartz vein fields of the Umm Ageuina region are located in the internal zone of the Mauritanides nappe complex, within NNE-SSW striking allochthonous infra- and supracrustal units and nappes (Soueïdyiât unit, Lécorché et al., 1989 ; Villeneuve et al., 2006). The main high density vein area (1.8 km<sup>2</sup>) investigated in this study is rooted in strongly foliated and gently dipping orthogneisses of Neoproterozoic minimum age (Gärtner et al., 2013), deformed under amphibolite facies conditions.

The Umm Ageuina individual quartz veins are a few meters up to 200m long, 5m thick as a mean, and are arranged as conjugate pairs arranged en echelon in section view. In map view, the traces of individual veins and vein arrays follow two dominant trends from the outcrop to the km scale, with a rhomboedric geometry.

Most hand specimen of quartz vein samples are pure, transparent, monocrystalline coarse-grained quartz samples (up to several cm in size), free of any other minerals (except some rare micas and cm-size sulfides). Low Ti-contents and a preliminary fluid inclusion study from 6 quartz samples (unpublished report J.L. Touret, date unknown) indicate that the quartz has crystallized at relatively low temperature (< 250°C). We suggest that the en echelon vein arrays in Umm Ageuina can not be understood as simple conjugate structures, but rather have formed during a bulk coaxial non-plane-strain deformation. The veins formed in tension under brittle conditions, in the hangingwall of the Tiferchaï normal fault, during a still poorly documented extensive tectonic event post-dating the Hercynian nappes emplacement ? This tectonic event is of unknown age (possibly as early as Jurassic, coeval with the opening of the Central Atlantic Ocean ?).

### 7.7.36 (p) Contribution à l'étude géologique du gisement argentifère de Roc Blanc (Jebilet centrales, Hercynien, Maroc)

Amal El Arbaoui<sup>1</sup>, Abderrahim Essaifi<sup>1</sup>, Amina Wafik<sup>1</sup>, Lhou Maacha<sup>2</sup>, Ahmed Radnaoui<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Dynamique de la lithosphère et Genèse des Ressources Minérales et Energétiques, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc

<sup>2</sup>MANAGEM Group, Casablanca - Maroc

Le gisement argentifère de Roc Blanc est situé dans le massif hercynien des Jebilet, à quelques kilomètres au NW de la ville de Marrakech. Il est encaissé dans une série sédimentaire marine d'âge Viséen supérieur : la série de Sarhlef qui forme l'unité centrale du massif. Cette série a été structurée lors des phases tectoniques hercyniennes et post hercyniennes et intrudée par un magmatisme bimodal, un pluton de granodiorite et des filons de leucogranites et de microdiorites. Elle est affectée par un métamorphisme régional anchi à épizonal et un métamorphisme de contact lié à la mise en place des intrusions magmatiques.

Le gisement de Roc Blanc est situé dans l'aurole de métamorphisme

de contact du pluton de granodiorite. Il s'agit d'un champ filonien composé de sept filons de direction N5° à N30° et de pendage 45° à 65° E. Ces filons, sub-concordants avec la schistosité, sont encaissés dans les schistes tachetés (séricito-schistes, schistes chloriteux et schistes gréseux). Ils ont une épaisseur de 1 à 1,5 m et une extension variant de 300 m à 600 m ; seul le filon 5 montre une longueur pouvant atteindre 2000 m.

La minéralisation forme des veines ou lentilles et présente une structure rubanée ou bréchique. Elle est constituée de pyrrhotite, pyrite, arsénopyrite, chalcoppyrite, sphalérite, galène, cuivre gris et minéraux d'argent. Les espèces minérales peuvent être classées en quatre groupes :

- Groupe de minéraux ferrifères : pyrrhotite, pyrite, arsénopyrite, chalcoppyrite et sphalérite.

- Groupe de minéraux plombifères et sulfoantimoniures de Pb et Ag : galène, boulangérite et owyheite.

- Groupe de minéraux argentifères : cuivre gris, pyrargyrite, argentite et argentopyrite.

- Groupe de minéraux de gangue : quartz, chlorite, sidérite, calcite et dolomie.

Du point de vue génétique, les filons argentifères de Roc-Blanc pourraient être mis en relation avec le plutonisme des Jebilet centrales et de l'activité hydrothermale associée.

### 7.7.37 (p) Chrome and Nickel Mineralization in the Ultramafic Massif of Beni Bousera (Internal Rif, Morocco)

Zaïneb Hajjar<sup>1</sup>, Amina Wafik<sup>1</sup>, Abderrahim Essaifi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory dynamique de la Lithosphère et Géologie des Ressources Minérales et énergétique, Department of Geology, Faculty of Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc

The ultramafic massif of the Beni Bousera (internal Rif) is a portion of an old sub-continental lithospheric mantle that suffered partial melting, just before its tectonic emplacement in the crust, probably during the Middle Miocene. The result is recrystallization of the rocks from spinel tectonite domain in the bottom to spinel/garnet mylonite domain in the top. Peridotites are most common facies of Beni Bousera massif, and are associated with minor amount of pyroxenites layers.

Cr-Ni mineralizations are associated with the ultramafic rocks of the Beni Bousera massif. They are located especially in a serpentinized area bordering the eastern contact of the massif. The mineralization occurs as few centimeters to 1 m-wide lenses striking N 80 ° and dipping 65-75 ° to N.

The Cr-Ni mineralization is mainly composed by chromite and arsenide associated to silicate gangue made of phyllosilicates and serpentines. We can found sulfides more or less altered in the intergranular space. We have also found grain of Au and alloys contained in the arsenides and / or dispersed in the silicates.

Geochemical data show that Cr-Ni mineralization is richer than hosted peridotite by PGE and Au ; due to their affinity with arsenide melt.

### 7.7.38 (p) Depositional environment of the Neoproterozoic Fe-Mn deposit of the Corumba basin, Mato Grosso do Sul, Brazil

Michel Lopez<sup>1</sup>, Joao Carlos Biondi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier

<sup>2</sup>Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brésil

The Neoproterozoic basin of Corumba represents a late orogenic poorly deformed and metamorphized domain. It is located on the eastern margin of the Amazon-Rio Apa shield in the foreland of the Paraguay fold belt (Brazilian orogeny). This basin is of particular interest because it records the transition between the late Cryogenian global glaciation during which a rich suite of Fe-Mn ore deposit was emplaced, and the post-glacial transgressive carbonates where the Ediacaran metazoan fauna where discovered. In order to better constrain the processes of Fe-Mn deposition detailed sedimentological and petrographical investigations were conducted in the glacial interval of the lower part of the series (Jacadigo Group). At the base, the 300m thick Urucum Fm. is mainly composed of medium to coarse grained carbonate cemented arkoses showing large trough cross-bedding and current ripples. It is interpreted as possible outwash fan and glacial flow fed from an inland glacier. This formation is topped by a 400m thick biochemical-dominated series, the Santa Cruz Fm. Four Mn layers, 1 to 5m thick, sandwiched into the monotonous hematite-jaspilite sequence were evidenced in the lower part showing a clear depositional symmetric cycle from Fe-cemented sandstone to a Mn-rich siltstone and massive to thinly laminated cryptomelane and vice versa. The sandstone of the footwall contains large dispersed floatstones. The lower Mn layer is more discontinuous and shows channelized debris-flow deposits reworking the cryptomelane initial deposit. This formation is interpreted as the gradual vanishing of the terrestrial input by the overall extension of the icecap and ice pack during the peak of the Marinoan global glaciation ; the confinement of the oceanic domain permitting the Fe-Mn dissolution in the anoxic deep basin, and massive Si/Fe precipitation in the coastal domain controlled by the redox window. In this model, the Mn precipitation is reported to partial oxygen increase during limited melting stages as indicated by sand and floatstone input.

### 7.7.39 (p) Evidence for syntectonic mineralization in the Kettara deposit : implications for genesis of massive sulphide deposits in the Variscan Belt of Morocco

Ismaïla Ndiaye<sup>1</sup>, Abderrahim Essaifi<sup>1</sup>, Michel Dubois<sup>2</sup>, K. Goodenough<sup>3</sup>, A. Boyce<sup>4</sup>, Brice Lacroix<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Cadi Ayyad University, Geology Department, Marrakech, Maroc

<sup>2</sup>LGCgE, Lille

<sup>3</sup>British Geological Survey, Edinburgh, Royaume-Uni

<sup>4</sup>SUERC, Rankine Avenue, Scottish Enterprise Technology Park, Royaume-Uni

<sup>5</sup>Faculty of geosciences and environment, Institute of earth sciences, University of Lausanne, Suisse

The Kettara deposit is considered as part of the Moroccan Variscan massive sulphide province. It consists of a sub-vertical pyrrhotite-rich massive sulphide lens located within a shear zone in the center of the Variscan Jebilet massif, north of Marrakesh. The hosting rocks are folded and cleaved thin-bedded Visean pelites with calcareous beds cut by dolerite dikes. Less than a few kilometers from the deposit are intrusive bodies belonging to a Carboniferous bimodal magmatic suite, including the syntectonic major mafic-ultramafic Kettara intrusion. Although the Kettara deposit has been partly mined in the past, there is little certainty about its origin.

The ore occurs as massive to semi-massive pyrrhotite enclosing fragments of the host schists, centimeter-scale mineralized syn-tectonic replacement veins in the wall rocks adjacent to the deposit and as cataclastically deformed pyrite veins associated with carbonates that cross-cut pyrrhotite mineralization. The shear displacement recorded by the deposit is lower than that recorded by the local stratigraphic markers. It is concluded that pyrrhotite was deposited during regional shearing and

metamorphism by replacement of wall rocks by a silica-rich fluid. A replacement of pyrrhotite by pyrite occurred during brittle to semi-brittle shearing and retrograde metamorphism by a Ca-rich fluid.

Sulphur isotopic composition of massive pyrrhotite (-1.6‰ to -0.5‰) indicates a sulphur source from the bimodal magmatic suite. The fluid inclusions study indicates that mineralizing fluid associated with pyrrhotite deposition was a mixture of water, N<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>, with low salinities (7.5 % NaCl), and were trapped at c. 200-300°C and c. 2Kb, which are typical for a low-grade metamorphic context.

The deposit may have formed by interaction between hydrothermal circulation driven by cooling of the nearby mafic-ultramafic Kettara intrusion, which provided sulphur and metals, and a regional metamorphic fluid flow through anastomosing shear zones.

#### 7.7.40 (p) Génération de fluides aquo-carboniques par décarbonatation à la transition fragile-ductile durant l'extension post-orogénique de la ceinture des Hellénides (Laurion, Grèce)

Christophe Scheffer<sup>1</sup>, Alexandre Tarantola<sup>1</sup>, Olivier Vanderhaeghe<sup>1</sup>, Adonis Photiades<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GeoRessources, Nancy

<sup>2</sup>Institute of Geology & Mineral Exploration (IGME), Acharnae, Grèce

La région du Laurion (Attique, Grèce continentale) est connue pour ses gisements en métaux de base Ag-Pb-Zn concentrés le long d'une zone de détachement post-orogénique qui furent exploités depuis l'antiquité et récemment jusqu'en 1977 (Société des Mines Françaises du Laurion). L'histoire géodynamique de la région est marquée par l'enfouissement puis l'exhumation polyphasée de roches métamorphiques. La dernière phase d'exhumation reflétant l'effondrement post-orogénique de la ceinture des Hellénides est marquée par le développement d'une direction préférentielle d'éirement d'orientation NNE-SSW et d'une zone mylonitique à faible pendage au sein des séries de marbres passant à une zone de cataclases de quelques mètres d'épaisseur.

L'analyse d'inclusions fluides (pétrographie, orientation, microthermométrie, Raman, isotopes stables) piégées au sein d'une veine de quartz au sein de ce détachement à proximité d'une zone anciennement exploitée (Kamariza) a permis de caractériser la nature des fluides ayant circulé pendant l'épisode extensif post-orogénique.

Une famille majoritaire aquo-carbonique peu salée se concentre au cœur des plans de déformation lamellaire des cristaux de quartz et au sein de fractures transgranulaires perpendiculaires à la direction générale d'extension NNE-SSW. Il s'agit de fluides faiblement salés (2 à 7 poids% eq. NaCl), riche en CO<sub>2</sub>, +/- CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, avec des traces d'H<sub>2</sub>S et d'H<sub>2</sub> montrant des températures d'homogénéisation de l'ordre de 340-350 °C.

L'analyse PVTX permet de reconstruire les dernières parties de l'exhumation de la région. Par ailleurs, l'équilibre isotopique entre cette population de fluides et les marbres encaissants, ainsi que des évidences pétrographiques suggèrent que ces fluides sont issus de la décarbonatation de la calcite à la transition fragile-ductile. Cet épisode de décarbonatation pourrait être l'événement précurseur permettant la cristallisation des minéralisations de type remplacement de carbonates (non-skarn).

#### 7.7.41 (p) Les minéralisations ferrifères du Nord-Est Algérien : Genèse et perspectives

Youcef Bouftouha<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Génie Géologique, Université de Jijel, Algérie

Le Nord-Est Algérien recèle un grand nombre de gîtes et indices de fer. Les concentrations ferrifères de cette région sont principalement, développées dans des environnements péri-granitiques et/ou péri-diapiriques. En environnement péri-granitique, les concentrations ferrifères sont associées aux skarns et en environnement péri-diapirique, les concentrations ferrifères résultent, soit de la transformation métasomatique des calcaires en sidérite (cas de Ouenza et Boukhadra dans les confins Algéro-Tunisiens), soit d'un remplissage hydrothermal de vides karstiques et de fractures dans les roches carbonatées ou dans les grès. Le minerai de fer, associé aux skarns, représenté par une association minérale, comportant : magnétite, hématite, goethite et du quartz, résulte de la phase d'altération hydrothermale tardive, qui a engendré la transformation totale ou partielle des masses de grenatites ferrifères (cas de la mine de fer d'Ain Sedma, Cap Bougaroun). En environnement péri-diapirique, le minerai de fer est essentiellement, représenté par de l'hématite et de la Goethite, résultant de l'oxydation de la sidérite et/ou du dépôt direct des oxydes et hydroxydes dans les vides des roches carbonatées et/ou en imprégnation dans les grès.

#### 7.7.42 (p) Contrôle structural de la minéralisation d'étain dans le district de Bou El Jaj, partie NE du massif central marocain

El Mustapha Seghir<sup>1</sup>, Hmidou El Ouardi<sup>1</sup>, Jeffrey Lindhorst<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université Moulay Ismail, Zitoune, Meknès, Maroc

<sup>2</sup>Kasbah Resources, South Perth, Australie

Le district de Bou El Jaj se situe dans la partie NE du massif central hercynien, à environ 60 km au Sud de la ville de Meknès, sur le prolongement NE de la faille de Smaâla-Oulmès, limitant l'anticlinorium de Khouribga-Oulmès à l'Ouest et le synclinorium de Foughal-Telt à l'Est. La série stratigraphique de cette région comprend des flyschs organisés en séquences turbiditiques du Paléozoïque supérieur (Viséen supérieur-Namurien), constituées par des schistes phylliteux et des grès fins à moyens avec des intercalations de bancs calcaires. L'ensemble est recoupé par des filons magmatiques, correspondant surtout à des rhyolites et à des gabbros doléritiques. Cette région est caractérisée par la présence de filons de tourmalinite. Le principal filon est orienté NE-SW avec un pendage généralement vers le NW. Il s'étend sur plus de 8 km depuis Bou El Jaj au sud jusqu'à Achmmach au nord. La cartographie géologique détaillée de ce secteur minier et l'analyse structurale et microtectonique, ont révélé l'existence de plusieurs structures minéralisées d'échelles variables et montré que ces minéralisations sont contrôlées par les déformations cassantes et plissées dans la région. Les plis dissymétriques à flancs longs NW et flancs courts SE, montrent des charnières sur-épaissies remplies de tourmaline. Celle-ci associée au quartz et à la cassitérite se rencontre aussi le long des zones de cisaillement orientées N70, déterminant parfois des ouvertures en pull-apart métriques. D'autres structures minéralisées sont orientées N35 à pendage fort vers le NW. Toutefois, les structures minéralisées en étain sont presque parallèles à la stratification et s'orientent généralement N30, 60NW. Ce travail de cartographie minière et d'analyse microtectonique, nous a permis de préciser le modèle structural interprétatif des minéralisations de la région.

## 7.8 *12<sup>e</sup> Colloque Annuel du Groupe Français des Argiles*

### Responsables :

- Francois Martin (GET, Toulouse)  
francois.martin@get.obs-mip.fr
- Jean-Louis Robert (IMPMC, Paris)  
jean-louis.robert@impmc.upmc.fr

### Résumé :

Le Groupe Français des Argiles (GFA), régi par la loi n° 08223 de 1901, fort de 150 membres, regroupe actuellement des membres issus du milieu académique et de l'industrie et a pour but de concourir aux progrès des connaissances sur les minéraux argileux, les argiles, les roches argileuses, les argiles de synthèse, les hydroxydes doubles lamellaires (HDL), les interactions argiles - polymères, les argiles et la santé, et d'un point de vue pluridisciplinaire, les techniques de caractérisations, les méthodes spectroscopiques et d'imagerie, ... Le Groupe Français des Argiles fait partie de l'Association des Groupes Européens des Argiles (EGCA) qui édite le journal *Clay Minerals*. Il est rattaché à L'Association Internationale pour l'Etude des Argiles (AIPEA). Enfin, le GFA est l'une des 26 associations fondatrices de la Fédération Française des matériaux (FFM) créée pour promouvoir les relations entre laboratoires, publics et privés, travaillant dans le domaine des matériaux en France. Son président actuel est Jean-Louis Robert (IMPMC, Université Pierre et Marie Curie, Paris).

### 7.8.1 *Keynote communication* : Importance of serpentinites in system Earth

Anne-Line Auzende<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IMPMC, Paris

Serpentinites are ubiquitous rocks that focus the curiosity of Earth scientists for many years now. The reason for such an enthusiastic attention lies in the recurrent illustration of the roles played by serpentinites in numerous settings worldwide (and extra-). In this presentation, we will detail serpentinization processes from pristine mantle rocks and discuss occurrence and microstructures of serpentine minerals. The presence of serpentine minerals in extraterrestrial systems will be evoked. We'll try and review some of the past and/or current processes involving serpentinites, such as providing a putative niche suitable for life emergence sustained by natural hydrogen production in the vicinity of marine hydrothermal systems. Serpentinites also influence the carbon cycle from the oceanic ridge down to the deep mantle via CO<sub>2</sub> sequestration, CH<sub>4</sub> production or C recycling through slab burial. We will then particularly focus on serpentinites in subduction zones, whose presence is acknowledged by seismological, rheological and geochemical evidence coupled to field observations (paleo-subduction zones, serpentine mud volcanoes). In these active settings, where material transit from the surface to depth, water together with many geochemical elements (REE, FME) trapped in serpentinites are transported and recycled in the mantle down to 170 km deep. Release of these elements during serpentine breakdown is believed to affect arc magmatism and, at greater scale, the geochemical evolution of the Earth through large elemental cycles from the surface to the deep interiors. The mechanical behaviour of serpentinites in subduction zones, particularly toward deformation, is also widely investigated as it influences deep-seated seismicity, high-pressure rock exhumation or mantle/slab mechanical decoupling. We will discuss the numerous deformation-related studies to infer the rheological significance of serpentinites in the subduction factory.

### 7.8.2 (o) Effet de la morphologie de kaolinites synthétiques sur leurs propriétés d'adsorption de cations inorganiques

Lei Lei Aung<sup>1</sup>, Emmanuel Tertre<sup>1</sup>, Sabine Petit<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IC2MP, Poitiers

Afin de prédire la migration des polluants dans les environnements naturels, les propriétés d'adsorption des particules à forte surfaces spécifiques, comme les minéraux lamellaires, vis-à-vis de solutés, doivent être connues avec précision. Ces propriétés sont à priori fortement corrélées aux propriétés morphologiques et surfaciques des particules. Néanmoins, aucune étude à notre connaissance ne relie directement les morphologies de particules de phyllosilicates à leurs propriétés d'échange cationique. Dans le cas des kaolinites naturelles, une charge permanente souvent significative et attribuable à des impuretés minéralogiques empêche toute tentative de relier directement la forme des particules à un coefficient de sélectivité entre deux cations pour des sites latéraux donnés. Des kaolinites ont donc été synthétisées par voie hydrothermale en considérant différent pH finaux de synthèse, afin d'obtenir des morphologies variées (hexagones à lattes). Pour les échantillons pour lesquels aucune impureté minéralogique et charge permanente n'a été détectée, des isothermes expérimentales d'adsorption entre Na<sup>+</sup> et H<sup>+</sup> ont été obtenues. Ces cations ont été choisis étant donné leurs présences ubiquistes dans les eaux naturelles et leur fort pouvoir compétiteur par rapport aux cations traces métalliques. Grâce aux surfaces spécifiques des sites latéraux et des densités de site, issues de la cristallographie, des différentes faces présentes dans nos échantillons ((010), (110), (1-10)),

un coefficient de sélectivité entre Na<sup>+</sup> et H<sup>+</sup> sur l'ensemble des sites latéraux d'une morphologie donnée a pu être estimé à l'aide d'un modèle de complexation de surface. Les résultats ont montré que le coefficient de sélectivité Na<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> dépendait très fortement de la morphologie de la particule, et que par conséquent les propriétés d'adsorption des kaolinites ne pouvaient pas être obtenues avec précision sans une connaissance fine de la morphologie des particules.

### 7.8.3 (o) Short-term lime solution-kaolinite interfacial chemistry and its effect on long-term pozzolanic activities

Yadeta Chemed<sup>1,2</sup>, Dimitri Deneele<sup>1,2</sup>, Angelina Razaftianamaharavo<sup>3</sup>, Guy Ouvrard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut des Matériaux de Nantes

<sup>2</sup>IFSTTAR, Bouguenais

<sup>3</sup>LIEC, Nancy

The soft geo-materials that commonly encounter in construction sites often do not meet the geotechnical requirements to ensure the sustainability of structures. Improving the mechanical property of these materials prior to construction with lime addition has become a common activity. However, still the mechanism of lime-clay interaction at the early stage of treatment has not been fully understood. For instance, the cause for delay of pozzolanic activity during lime treatment of kaolinite is still unknown. In addition, the technique is reported to be ineffective for unknown reason in some mica rich materials. To overcome this inefficiency and optimize the lime treatment technique, it is necessary to understand the reactivity between lime and clay minerals. It is, therefore, the objective of this study to examine the kaolinite-lime solution interfacial phenomenon. The kinetics of adsorption of Ca by five Na-kaolinites (two low-defect and three high-defect samples) from saturated lime solution was studied using batch technique. The adsorption occurred rapidly in the first five minutes due to adsorption of CaOH<sup>+</sup> both on permanent and pH dependent charge site and then slowly at higher contact time due to involvement of precipitation and intra-particle diffusion. Besides, the more the amount of Ca adsorbed, the less is the concentration of Si and Al measured in supernatant suggesting the adsorbed Ca-ion prevents the dissolution of kaolinite. Low pressure Ar-gas adsorption technique was used to identify adsorption site. It suggested the interaction of Ca and kaolinite predominantly occurred on the basal face. The pH-zeta potential curve of kaolinite suspension showed drastic change in suspension behaviour at pH > 9. Furthermore, it progressively shifted towards the zeta potential curve of Ca(OH)<sub>2</sub> with increasing pH and concentration of Ca in solution revealing the precipitation (nucleation) of Ca(OH)<sub>2</sub> on the surface of kaolinite.

### 7.8.4 (o) Transformations thermiques et structurales de la kaolinite intercalée avec de l'urée

Sahar Seifi<sup>1</sup>, Philippe Blanchart<sup>2</sup>, Sabine Petit<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IC2MP, Poitiers

<sup>2</sup>ENSCI-GEMH, Limoges

De la kaolinite intercalée avec de l'urée a été préparée à partir du kaolin Kg1 par mélange ou par broyage en suspension aqueuse, à 20°C. Avec ces 2 méthodes, le degré d'intercalation a atteint respectivement 72% et 69%. La kaolinite intercalée a des applications potentielles intéressantes dans l'industrie des matériaux céramiques puisque l'affaiblissement des liaisons hydrogène inter feuillets conduit à une délamination et à l'accélération des transformations thermiques. Dans cette étude, de

la kaolinite-urée a été caractérisée par DRX, montrant l'expansion de la distance inter-feuillets de 0.715 nm à 1.069 nm. Simultanément, la spectrométrie IR montre notamment la disparition de certaines bandes relatives aux groupes hydroxyles externes de la kaolinite, ainsi que l'apparition de nouvelles bandes associées aux liaisons urée-groupes hydroxyles externes. L'évolution des caractéristiques structurales a été corrélée avec les processus de transformations thermiques par TG et DSC, montrant notamment la réduction de la température de déshydroxylation qui conduit à la formation de la phase métakolinite à plus basse température. Comme le montre les études par dilatométrie, ce phénomène est favorable à l'abaissement de la température de frittage du kaolin et des compositions céramiques contenant du kaolin.

### 7.8.5 (o) Indice de Kaolin à Koutaba (Ouest - Cameroun) : caractérisation minéralogique et physico-chimique

Abiba Abiba Nkalih Mefire<sup>1,2</sup>, André Njoya<sup>3</sup>, Jacques-Richard Mache<sup>4</sup>, Rose Yongue Fouateu<sup>2</sup>, Sofia Siniapkine<sup>1</sup>, Pierre Flament<sup>5</sup>, Nathalie Fagel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>AGEs, Département de Géologie, Liège, Belgique - Belgique

<sup>2</sup>Lab. Métallurgie, Département de Géologie, Université Yaoundé I, Cameroun

<sup>3</sup>IBAF, Université Dschang, Foumban, Cameroun

<sup>4</sup>Mipromalo, Yaoundé, Cameroun

<sup>5</sup>Inisma, Mons, Belgique

Dans le cadre d'un programme de cartographie et de valorisation des matériaux argileux en vue du renforcement de la promotion des matériaux locaux au Cameroun, des travaux sont engagés en vue de l'identification des argiles naturelles pour produits de terre cuites (brique, poterie, tuile) à Foumban et ses environs (Ouest-Cameroun). Des indices de kaolin ayant été identifiés dans la région de Koutaba, ce travail présente les résultats minéralogiques, chimiques, géotechniques et céramiques obtenus sur 4 échantillons représentatifs de ce site. La diffraction des rayons X (DRX) montre que la kaolinite est le minéral dominant, elle est associée au quartz, à l'illite et auxfeldspathspotassique et sodique. Sont aussi identifiés mais en proportions faibles et variables des oxyhydroxydes de fer comme la goethite, l'hématite et la gibbsite. Les analyses thermiques (ATG-DTG) confirment les résultats minéralogiques. Le pic principal endothermique se situe entre 450°C et 500°C, il correspond à la déshydroxylation de la kaolinite. Le pic secondaire endothermique autour de 200°C marque la présence des oxyhydroxydes de fer et d'aluminium, il est très prononcé pour un des échantillons (éch. 3). Les analyses chimiques des éléments majeurs montrent que SiO<sub>2</sub> (>60%) et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (15-20%) sont les principaux constituants de tous les échantillons (rapport SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≥ 3). Les teneurs en TiO<sub>2</sub> (< 0,2 à 1,2 %) et K<sub>2</sub>O (0 à 1%) sont variables. Les échantillons présentent généralement des teneurs faibles en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (< 2%), sauf dans l'échantillon riche en oxyhydroxydes (échantillon 3 = 9%). Ces résultats préliminaires doivent être complétés par des essais géotechniques (plasticité et granulométrie), structuraux (CEC, surface spécifique) et céramiques (mise en forme, dilatométrie, retrait linéaire) afin de préciser la valorisation optimale du kaolin de Koutaba dans le domaine des céramiques au sens large et des réfractaires en particulier. Une cartographie de la zone devrait permettre d'estimer l'extension verticale et latérale de ce gisement argileux.

### 7.8.6 (o) Étude des transformations morpho-cristallochimiques de diverses argiles kaoliniques lors d'une calcination flash

Marie Claverie<sup>1</sup>, François Martin<sup>1</sup>, Jean-Paul Tardy<sup>2</sup>, Martin Cyr<sup>3</sup>, Philippe De Parseval<sup>1</sup>, Olivier Grauby<sup>4</sup>, Anne-Magali

Seydoux-Guillaume<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Argeco Développement, Fumel

<sup>3</sup>Laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions, Toulouse

<sup>4</sup>Centre Interdisciplinaire de Nanoscience de Marseille

L'utilisation d'argiles calcinées, en tant que matériaux pouzzolaniques ajoutés aux bétons et mortiers, est fréquente en génie civil. L'entreprise Argeco Développement (Toulouse, France) produit depuis 2006, au sein de son usine de Fumel (47), un matériau présentant une activité pouzzolanique : le métakaolin. La spécificité de cette entreprise est de fabriquer à partir de kaolin, du métakaolin grâce à une technique de calcination flash. Ce traitement thermique consiste à porter des kaolins (contenant kaolinite, quartz et minéraux accessoires) à des températures élevées (autour de 800°C et jusqu'à 1100°C aux abords de la flamme) en des temps très courts (quelques millisecondes). La déshydroxylation de la kaolinite a alors lieu, engendrant une phase amorphe usuellement très réactive dans des environnements basiques tels que les matrices cimentaires. Le but de cette étude est de comprendre les changements morphologiques sur 3 kaolins commerciaux lors de la calcination flash et à les comparer avec ceux obtenus lors d'un traitement thermique traditionnel : réacteur à lit fixe (700°C pendant 5 heures). Ces transformations sont suivies par plusieurs méthodes analytiques (IRTF, RMN-MAS, DRX, MEB-FEG, MET, Microsonde), afin d'étudier les changements d'états cristallins et cristallochimiques, de façon à comprendre la formation de particules sphériques (de quelques micromètres de diamètre), exclusivement formées lors de la calcination flash. La kaolinite n'apparaît pas totalement déshydroxylée lors de la calcination et la proportion de kaolinite non transformée est supérieure dans un métakaolin flashé qu'au sein d'un métakaolin cuit en lit fixe. Les sphères, observées parmi les métakaolins flashés, ont été découpées à l'aide d'une sonde ionique focalisée (FIB), permettant ainsi de mettre en évidence leur contenu : une sphère pleine composée d'une phase amorphe de silicate d'alumine. L'exposé s'attardera à montrer que ces particules sphériques sont issues de la fusion d'un grand nombre de kaolinites nanométriques.

### 7.8.7 (o) Étude de la réactivité d'une source aluminosilicatée constituée d'un métakaolin modèle et d'une « argile Tunisienne » en présence de solutions alcalines

Ameni Gharzouni<sup>1,2</sup>, Emmanuel Joussein<sup>3</sup>, Basma Samet<sup>2</sup>, Samir Baklouti<sup>2</sup>, Sylvie Rossignol<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Science des Procédés Céramiques et de Traitements de Surface, Limoges

<sup>2</sup>Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Tunisie

<sup>3</sup>Groupement de Recherche Eau, Sol, Environnement, Limoges

L'élaboration de nouveaux matériaux de construction plus économiques, peu énergivores et moins polluants demeure un défi d'actualité. Les matériaux géopolymères ont suscité l'intérêt de part leur méthode de synthèse, leurs propriétés d'usage intéressantes et leur large gamme d'applications. Le métakaolin est la source aluminosilicatée la plus utilisée pour la synthèse des matériaux géopolymères en raison de sa pureté et sa réactivité élevée mais l'utilisation d'argiles kaoliniques en tant que source alternative semble être profitable vu leur faible coût et leur grande abondance. Cette étude se focalise sur la formulation de matériaux géopolymères à base d'une « argile Tunisienne » provenant de la région de Médénine et d'un métakaolin modèle. Pour cela, les matières premières ont été, tout d'abord, caractérisées par analyses chimiques et minéralogiques. Ensuite, plusieurs échantillons de géopolymères ont été synthétisés à base de métakaolin, et d'argile de Médénine calcinée et

des mélanges des deux en présence de solutions alcalines ayant différents rapports molaires Si/K. L'évolution structurale des mélanges a été contrôlée par spectroscopie infrarouge. Les propriétés mécaniques ont été évaluées par des essais de compression et les observations morphologiques ont été réalisées par microscopie électronique à balayage (MEB). Les résultats ont permis de mettre en évidence le rôle du métakaolin et des différents minéraux associés et/ou accessoires dans le cas de l'argile de Médénine. Ceci induit différentes réactivités et propriétés en présence des solutions alcalines. Les minéraux non kaoliniques apportés par « l'argile de Médénine » semblent renforcer la structure des géopolymères. Par contre, le degré de dépolymérisation de la solution alcaline semble contrôler la cinétique de formation des géopolymères ainsi que leurs performances mécaniques.

### 7.8.8 (o) Effet de la kaolinite et de la montmorillonite sur l'hydratation du ciment Portland

Dimitri Deneele<sup>1,2</sup>, Michael Paris<sup>1</sup>, Jamal Yousaf<sup>1</sup>, Ivan Serclerat<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institut des Matériaux de Nantes

<sup>2</sup>IFSTTAR, Bouguenais

<sup>3</sup>Lafarge Research Centre, Saint-Quentin-Fallavier

Dans un contexte de réduction de la consommation des ressources naturelles et de réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'industrie cimentière cherche à promouvoir l'utilisation de nouvelles ressources dans la production du ciment. Ces ressources sont des pouzzolanes naturelles (pouzzolanes volcanique, zéolites) ou des pouzzolanes artificielles (métakaolin). Une utilisation systématique et maîtrisée de ces ressources passe toutefois par une compréhension fine de l'effet de ces pouzzolanes sur l'hydratation du ciment. La présente étude s'inscrit dans ce cadre en cherchant à comprendre spécifiquement comment les minéraux argileux, parfois associés à ces pouzzolanes, modifient la séquence d'hydratation du ciment. Des expérimentations ont été menées sur des pâtes de ciment et des mortiers et l'hydratation du ciment est suivie par résonance magnétique nucléaire (<sup>29</sup>Si, <sup>27</sup>Al), spectroscopie infrarouge à transformé de Fourier (FTIR), analyses thermiques et diffraction des rayons X.

La substitution partielle du clinker par des argiles (20% de kaolinite ou de montmorillonite) conduit à une accélération de l'hydratation du ciment. Du point de vue réactionnel, cela s'explique par une dissolution plus importante des phases silicatées et une quantité de silicates de calcium hydratés (C-S-H) plus importante. La connectivité des C-S-H est modifiée à court terme et pourtant, la performance mécanique à long terme est plus faible lors de l'utilisation d'argiles. D'ailleurs si la dissolution des argiles est très faible dans ces systèmes cimentaires, une réaction pouzzolanique entre la portlandite libérée par le ciment et la montmorillonite est proposée afin d'expliquer la consommation de la portlandite. La kaolinite accélère en outre la conversion AFt à AFm et une interaction spécifique de la portlandite (Ca(OH)<sub>2</sub>) avec la kaolinite est proposée.

### 7.8.9 (o) Des barrières géosynthétiques à base d'organoclay : une véritable étanchéité ?

Lydie Le Forestier<sup>1</sup>, Régis Guégan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

Les matériaux hybrides à base de minéraux argileux et de surfactants cationiques, dits organoclay, sont reconnus pour leurs excellentes propriétés d'adsorption de divers composés organiques, et plus particulièrement de contaminants non polaires hydrophobes. Aussi, ces matériaux ont été proposés comme des alternatives réalistes pour le traitement de

l'eau et comme barrière géosynthétique dans les sites de stockage de déchets. Cependant, l'efficacité du confinement des contaminants organiques par les organoclay dépend principalement de la nature du surfactant, de sa proportion par rapport à la CEC et de son arrangement. Si les propriétés de séquestration ont pu être constatées lors d'expériences en batch, peu voire aucune étude n'a pu mettre en évidence leurs performances d'étanchéité lors d'expériences de percolation. La technique d'œdométrie offre l'opportunité de simuler le comportement d'un matériau compacté et infiltré sous pression avec des solutions de polluants sélectionnés. Cette étude met l'accent sur le comportement hydromécanique et hydrique de quatre familles d'organoclay synthétisés à partir de la smectite de référence du Wyoming échangée sodique et de surfactants cationiques à courte chaîne carbonée (TMA et BTA) et à longue chaîne carbonée (HDTMA et BDTA). Les résultats obtenus par œdométrie et diffraction des rayons X à hygrométrie contrôlée montrent l'importance de la nature du surfactant et de son organisation sur les propriétés hydriques macroscopiques (conductivité hydraulique) et microscopiques (gonflement à l'échelle du feuillet) des organoclay. Quel que soit le surfactant intercalé, la conductivité hydraulique est fortement augmentée (au minimum, deux ordres de grandeur) comparée à la smectite de référence non traitée, et montre, pour les organoclay avec des surfactants à longue chaîne carbonée, un comportement s'apparentant à de véritables « passoirs » pouvant remettre en question leurs propriétés environnementales.

### 7.8.10 (o) Encapsulation de nanoparticules d'HDL au sein de particules de latex par polymérisation en émulsion

Vanessa Prevot<sup>1</sup>, Dessislava Kostadinova<sup>1</sup>, Ana Cenacchi Perreira<sup>2</sup>, Muriel Lansalot<sup>2</sup>, Franck D'agosto<sup>2</sup>, Fabrice Leroux<sup>1</sup>, Christine Taviot-Guého<sup>1</sup>, Elodie Bourgeat-Lami<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut de Chimie de Clermont-Ferrand, Clermont-Ferrand

<sup>2</sup>Laboratoire de Chimie, Catalyse, Polymères et Procédés, Lyon

Dans le domaine des matériaux nanocomposites, l'addition de nanoparticules anisotropes telles que des nanotubes de carbone ou encore des plaquettes d'argiles induit une amélioration importante des propriétés, que ce soit du point de vue de la tenue mécanique, de la résistance ou encore de la conductivité thermique ou électrique.

Dans ce contexte, l'utilisation de nanocharges inorganiques encapsulées au sein de particules de latex apparaît comme une approche de choix afin d'élaborer des films nanocomposites de latex. Parmi les charges inorganiques envisageables, les Hydroxydes Doubles Lamellaires (HDL) matériaux lamellaires facilement synthétisables en laboratoire sont largement utilisés comme alternative aux argiles cationiques pour la préparation de matériaux nanocomposites.

Dans cette étude, nous avons utilisé la versatilité des HDL, pour adapter un procédé de polymérisation en émulsion basée sur une polymérisation radicalaire contrôlée par transfert de chaîne réversible par addition-fragmentation (RAFT)<sup>2</sup>. Dans un premier temps des solutions colloïdales des nanoparticules d'HDL en suspension ont été élaborées en combinant coprécipitation rapide et traitement hydrothermal. Ces particules ont ensuite été modifiées par adsorption ou échange anionique avec des agents macro-RAFT portant des groupements carboxylate susceptibles d'interagir avec la surface des feuillets d'HDL. L'influence de la présence des agents RAFT sur la stabilité colloïdale des suspensions ainsi que sur la structure des HDL a été étudiée par diffusion dynamique de lumière, diffraction des rayons X, spectroscopie infra-rouge... Dans un second temps, les particules hybrides HDL / agents macro-RAFT ont été utilisées comme germes de polymérisation en émulsion du méthyl méthacrylate et de l'acrylate de butyle, afin d'obtenir des nanoparticules d'HDL encapsulées dans des particules de latex.

### 7.8.11 *Keynote communication* : Characterization of clayey formations through a multi-scale and multi-disciplinary approach

Claire Fialips<sup>1</sup>, Jean-Paul Laurent<sup>1</sup>, Bernard Labeyrie<sup>1</sup>, Benoit Lasserre<sup>1</sup>, Valérie Burg<sup>1</sup>, Patrick Simeone<sup>1</sup>, Thierry Kinderstuth<sup>1</sup>, François Umbhauer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

Large resources of oil and gas do exist in unconventional shale reservoirs. Following technological progresses in hydrocarbons recovery from low-permeability source-rocks (horizontal drilling, hydraulic fracturing) and commercial successes of shale-gas in North America, the exploitation of unconventional reservoirs is steadily emerging worldwide.

Several key parameters have to be assessed to evaluate the HC potential of source-rocks, including organic content and maturity, porosity, and brittleness. Some parameters are obtained from seismic imaging or well logs but accurate measurements of TOC, mineralogy, porosity, permeability, and geomechanical properties on statistically representative sets of core samples or drill cuttings are crucial for proper interpretation and calibration of logs and delineation of lithology and sweet-spots. Such measurements on shales are challenging because of their fine-grained texture, small pore sizes, low permeability (nanodarcy range), and significant amount of clay minerals (often >30%).

A multi-scale and multi-disciplinary workflow is used to acquire mineralogical parameters. It involves CT-scan imaging and semi-continuous loggings of the elemental composition of cored sections. Quantitative mineralogical analysis are performed on core samples using a numerical quantification process, called QM, which fully integrates standard XRD analyses with a suite of specific chemical and physical measurements on the same samples. Micro-XRF chemical analysis of very small area in thin-sections with a FEG-SEM equipped with XRF detectors improves the quantification of clay minerals. SEM imaging and mineralogical mapping by energy-dispersive X-ray spectroscopy allow detailed visualization of textural arrangements and porosity. A newly developed spectral analysis engine is now allowing the automatic identification and 2D-quantification of mineral components with fairly high accuracy compared to the QM method.

### 7.8.12 (o) Etude du comportement de matériaux argileux sous irradiation

Maxime Lainé<sup>1</sup>, Sophie Le Caer<sup>1</sup>, Jean-Louis Robert<sup>2</sup>, Thierry Allard<sup>2</sup>, Maxime Guillaumet<sup>2</sup>

<sup>1</sup>SIS2M, Gif-sur-Yvette Cedex  
<sup>2</sup>IMPMC, Paris

Actuellement, l'alternative choisie afin d'isoler les déchets nucléaires Haute Activité (HA) et Moyenne Activité-Vie Longue (MAVL) de notre environnement jusqu'à leur décroissance radioactive est le stockage géologique profond. Ainsi, il est envisagé d'utiliser une argile, la bentonite MX-80, comme constituant de la barrière ouvragée. Il est donc primordial de comprendre comment les rayonnements ionisants affectent ce type d'argile, et quels sont les paramètres importants qui conditionnent sa réactivité sous irradiation (nature de l'argile, teneur en eau...).

Notre travail est principalement centré sur la montmorillonite (constituant principal de la bentonite MX-80), le talc et la saponite afin de comprendre l'influence éventuelle des charges de surface des feuillettes sur la réactivité. Les argiles étudiées sont des analogues synthétiques de composition choisie. Les synthèses sont réalisées à l'IMPMC, Institut de Minéralogie et de Physique des Milieux Condensés de l'Université

Pierre et Marie Curie par voie hydrothermale, selon une méthode sol-gel.

L'hydrogène présent au sein de ces argiles sous différentes formes donne lieu, sous l'effet des rayonnements ionisants, à une libération de dihydrogène. Le suivi de ce dégagement de dihydrogène par chromatographie gazeuse est un excellent indicateur de la réactivité de l'argile sous rayonnement. Il est donc important de savoir quel type d'hydrogène (eau de surface, eau interfoliaire ou groupements hydroxyles) est responsable de ce dégagement. Pour cela, nous réalisons les études à différentes humidités relatives. La quantité en eau ainsi que la structure de l'argile sont suivies par spectroscopie infrarouge, par analyse thermogravimétrique et par diffraction des rayons X. Enfin, la RPE est utilisée afin d'identifier les défauts créés par l'irradiation.

### 7.8.13 (o) Echange des cations inorganiques majeurs (Na, K, Ca, Mg, H) sur une beidellite : approche expérimentale et modélisation

Valentin Robin<sup>1,2</sup>, Emmanuel Tertre<sup>1</sup>, Daniel Beaufort<sup>1</sup>, Paul Sardini<sup>1</sup>, Olivier Regnault<sup>2</sup>, Michaël Descostes<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IC2MP, Poitiers

<sup>2</sup>Areva mines, Paris La Défense

Des modèles de transport réactif sont généralement utilisés pour prédire l'évolution des polluants dans le temps et l'espace après la fermeture de sites miniers. Dans ce cadre, l'adsorption des pénalisants et de leurs compétiteurs (cations majeurs) à la surface des minéraux constituant la roche doit être prédite. Du fait de leur capacité d'échange, des smectites à charge tétraédrique (beidellite) sont les principaux minéraux responsables des propriétés d'adsorption de grès exploités pour l'uranium au Kazakhstan. Peu de données existent dans la littérature sur ce point, cette étude a donc pour but de proposer un modèle d'échange d'ions capable de reproduire des isothermes expérimentales d'adsorption obtenues pour différents couples de cations sur une beidellite saturée-Na. Les isothermes ont été obtenues pour les principaux cations majeurs des eaux naturelles (H<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> et K<sup>+</sup>), et ont été interprétées avec un modèle basé sur la convention Gaines-Thomas impliquant 3 sites dont la somme des concentrations de site est égale à la capacité d'échange cationique de la beidellite. Le jeu de coefficient de sélectivité impliquant les 5 cations étudiés a été appliqué pour prédire l'évolution de la composition en cations adsorbés d'une beidellite en contexte de réhabilitation de site minier d'uranium. En comparant ces résultats avec ceux prédits par un modèle à trois sites basé sur les données bibliographiques obtenues sur une montmorillonite (smectite à charge octaédrique), un effet de la localisation de la charge de la smectite a été mis en évidence. Le modèle proposé pour la beidellite est valide pour une normalité en chlorure >10<sup>-3</sup> mol/L, un pH compris entre 1 et 7, et des concentrations aqueuses en cations comprises entre 10<sup>-3</sup> et 10<sup>-1</sup> mol/L. Ce modèle pourrait être intégré à un code de transport réactif, et permettrait une meilleure compréhension des mécanismes d'adsorption ayant lieu dans d'autres environnements où la beidellite est présente (sols, argilite).

### 7.8.14 (o) Dynamique de l'eau et réactivité sous irradiation dans des montmorillonites

Sophie Le Caer<sup>1</sup>, Chloé Fourdrin<sup>2</sup>, Christelle Latrille<sup>3</sup>, Faïza Bergaya<sup>4</sup>, Manuela Lima<sup>5</sup>, Roberto Righini<sup>5</sup>

<sup>1</sup>SIS2M, Gif-sur-Yvette

<sup>2</sup>LSI, Ecole Polytechnique de Palaiseau

<sup>3</sup>SECR, CEA/Saclay, Gif-sur-Yvette

<sup>4</sup>CRMD, Orléans

<sup>5</sup>LENS, University of Florence, Italie

La compréhension des phénomènes d'irradiation dans les matériaux argileux est particulièrement importante dans le contexte du stockage en couche géologique profonde des déchets radioactifs. Au cours de leur utilisation, ces argiles vont subir des variations de leur teneur en eau. Il est donc important de comprendre la chimie sous rayonnement de ces systèmes complexes.

Dans ce travail, nous nous intéressons à la radiolyse de l'eau confinée dans des argiles (ici quatre montmorillonites à différentes humidités relatives et avec différents cations échangeables). Les résultats montrent notamment que l'efficacité de la radiolyse dépend principalement de la quantité d'eau initiale. Un effet du cation échangeable est mis en évidence, en fonction de son enthalpie d'hydratation. Pour une distance basale inférieure à 1,3 nm, la production de dihydrogène augmente ; pour des échantillons ayant une distance basale supérieure à 1,3 nm, elle est proche de celle observée dans l'eau volumique. Des simulations ont montré que pour une distance basale supérieure à 1,3 nm, le réseau de liaisons hydrogène est étendu dans l'espace interfoliaire [1]. Ce réseau étendu permet alors un transfert d'énergie efficace depuis les feuillets jusqu'à l'espace interfoliaire, ce qui montre que la quantité d'eau conditionne l'efficacité du transfert d'énergie et donc la production de dihydrogène dans les montmorillonites sous irradiation [2].

Enfin, des expériences de dynamique de la liaison hydrogène (expériences pompe infrarouge ?sonde infrarouge à l'échelle femtoseconde) indiquent que, dans ces systèmes, la rotation des molécules d'eau dans l'espace interfoliaire est bloquée sur des échelles de temps de plusieurs picosecondes [3].

Références :

[1] Boek, E.S., et al. (1995) J. Am. Chem. Soc., 117, 12608.

[2] Fourdrin, C. et al. (2013) Environ. Sci. Technol., 47, 9530.

[3] Le Caër, S. et al. (2012) J. Phys. Chem. C, 116, 12916.

### 7.8.15 (o) Adsorption de substances médicamenteuses par une smectite de référence et des organoclays

Thomas Thiebault<sup>1</sup>, Régis Guégan<sup>1</sup>, Mohammed Boussafir<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

Grace à leurs excellentes propriétés d'adsorption les minéraux argileux et leurs organoclays associés sont mis en application comme filtres sélectifs de polluants organiques pour les eaux de surface et usées. Récemment, ces matrices ont été proposées comme matériaux pour l'adsorption de polluants émergents non dégradés comme les composés pharmaceutiques dont leur consommation dans la vie quotidienne n'a cessé d'augmenter ces dernières décennies. Cependant, la stabilité des complexes matrice minérale ? composés pharmaceutiques ou métabolites associés dépend étroitement des interactions mises en jeu entre la surface minérale et les molécules organiques et d'autre part de l'organisation structurale et la dynamique des phases organiques confinées à l'échelle microscopique (i.e. l'espace interfeuillelet des matériaux lamellaires).

Cette étude vise à cerner les mécanismes d'adsorption à différentes échelles (moléculaire, méso- et macroscopique) de plusieurs familles de produits médicamenteux comme les psychotropes (Tramadol, Doxépine) et les anti-inflammatoires (Ibuprofène, Diclofénac) sur une smectite de référence (Wyoming) échangée sodique et différents organoclays suivant différentes conditions environnementales telles que la température et le pH. Les isothermes d'adsorption répondant à des modèles de type Langmuir ou Freundlich, confrontées à des résultats complémentaires obtenus par diffraction des rayons X et spectroscopie infrarouge ont permis de mettre en évidence l'affinité toute particulière des

composés organiques avec les différents matériaux lamellaires. L'efficacité des propriétés d'adsorption des différents matériaux lamellaires dépend aussi bien de leur nature chimique (hydrophobe/hydrophile) que des groupements fonctionnels des substances médicamenteuses et des conditions expérimentales testées.

### 7.8.16 (o) Application de la palygorskite Algérienne dans le traitement des eaux usées

Lamia Dali Youcef<sup>1</sup>, Lala Setti Belaroui<sup>1,2</sup>, Abdelkader Bengueddach<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de chimie des matériaux, Faculté des sciences exactes et appliquées, Oran El M'Naouer, Algérie

<sup>2</sup>Departement de pharmacie, Faculté de Médecine, Université d'Oran, Algérie

La production synthétique et l'usage de colorants a généré la coloration des eaux usées. Le bleu de méthylène très utilisé comme colorant, et vu sa solubilité dans l'eau, il maximise ses chances d'être un contaminant pour les effluents industriels et développer son activité pour causer des tumeurs et des cancers. Pour son élimination, l'adsorption est le challenge majeur trouvé.

L'attapulgit est appelée silicate de magnésium et d'aluminium hydratés, de la famille des argiles fibreuses. Des caractérisations ont été investies dans le but d'identifier le matériau argileux ; la diffraction des rayons X, la spectroscopie infrarouge, la microscopie électronique à balayage et la fluorescence X. Nous avons pu confirmer que cette argile est une palygorskite carbonatée avec un pic principal à 10,5Å (1 1 0), et une composition chimique SiO<sub>2</sub> 39,319% ; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 8,77% ; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2,789% ; MgO 7,93% ; CaO 12,383%.

La palygorskite possède une charge négative permanente en surface, et le bleu de méthylène étant un colorant cationique, l'argile pourrait être un bon adsorbant. Dans ce but, des paramètres d'équilibre ont été étudiés ; la vitesse d'agitation, le temps de contact entre le matériau fibreux et le colorant et les masses de l'adsorbant et l'adsorbat. Les résultats nous ont permis d'obtenir un taux d'adsorption de 97% après seulement 5 minutes de réaction, et la modélisation des isothermes d'adsorption a permis de conclure que le bleu de méthylène s'adsorbe sur la palygorskite Algérienne en monocouche suivant le modèle de Langmuir avec une capacité maximale d'adsorption de 57,47mg/g, en plus, l'étude thermodynamique a prouvé que cette réaction est endothermique. Par contre la cinétique révèle que le modèle est du second ordre avec une constante cinétique de 0,203.

### 7.8.17 (o) Élimination des traces de fenarimol par des nanoparticules FexOy-Palygorskite Algérienne

Affaf Ouali<sup>1</sup>, Lala Setti Belaroui<sup>1</sup>, Maranzazu Heras-Peña<sup>2</sup>,  
Abdelkader Bengueddach<sup>1</sup>, Alberto Lopez Galindo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de chimie des matériaux, Faculté des Sciences Exactes et Appliquées, Université d'Oran, Algérie

<sup>2</sup>CSIC, Granada, Espagne

Ce travail consiste à l'étude de la rétention des traces d'un fongicide, fenarimol en milieu aqueux par des nanoparticules de FexOy/palygorskite Algérienne. Celles-ci ont été synthétisées par co-précipitation de deux précurseurs de fer Fe<sup>2+</sup> et Fe<sup>3+</sup> en milieu alcalin supporté sur le matériau fibreux.

L'étude de l'adsorption du fenarimol a été menée sur trois échantillons de la palygorskite Algérienne : brute inférieure à 90 μm « Atta@dz », purifiée « P-Atta@dz » et modifiée aux oxydes de fer magnétique « FexOy-Atta@dz ». Les paramètres d'adsorption, tels que la masse d'adsorbant,

concentration initiale d'adsorbant, temps de réaction et pH, ont été optimisés par des essais en batch et le suivi de la concentration du fongicide par HPLC. Les tests présentent un taux d'adsorption de 70%, 50% et 11% respectivement pour FeXOY-Atta@dz, P-Atta@dz et Atta@dz. Les résultats montrent que l'équilibre d'adsorption est plus rapidement atteint pour FeXOY-Atta@dz et Atta@dz que pour P-Atta@dz. Dans les trois cas l'adsorption suit une cinétique de pseudo second ordre. Par ailleurs les isothermes d'adsorption ont été modélisées par les équations de Langmuir, Freundlich, Temkin et Dubinin-Radushkevich afin d'évaluer le taux d'adsorbant et d'en déduire le mécanisme d'adsorption associé. L'ajustement des isothermes a montré que nos résultats expérimentaux s'accordent parfaitement avec les modèles Langmuir, Temkin et Dubinin-Radushkevich.

### 7.8.18 (o) Potentiel des atterrissements d'argiles du bassin versant de la Durance en vue de leur valorisation dans l'industrie des matériaux naturels de construction en terre cuite

Frédéric Haurine<sup>1,2</sup>, Isabelle Cojan<sup>2</sup>, Marie Anne Bruneaux<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre Technique des Matériaux Naturelles de Construction, Paris

<sup>2</sup>Centre de Géosciences, École nationale supérieure des mines de Paris, Fontainebleau

Face aux problématiques environnementales actuelles, la préservation des ressources naturelles prend une part de plus en plus importante. Les atterrissements d'argiles d'un cours d'eau, notamment ceux associés aux ouvrages hydrauliques, constituent dans ce contexte, des alternatives possibles à l'exploitation des carrières. Nous présentons ici les éléments de la démarche suivie pour estimer le potentiel de valorisation de ce type d'atterrissements en vue d'une utilisation dans l'industrie de la terre cuite, à partir de l'exemple du système Durancien.

La Durance et ses affluents sont caractérisés par un flux de matières en suspension (MES) important. Une partie de ces MES est exportée jusqu'au Rhône (3Mt/an), une autre (au moins 1Mt/an) est piégée dans les retenues de barrages hydroélectriques, au nombre de 17 sur le système Durancien. Ce flux, comparé à la consommation annuelle de matières premières argileuses de l'industrie de la terre cuite (7Mt/an), est tout à fait significatif.

La comparaison des compositions minéralogiques et géochimiques de prélèvements de 3 barrages, Serre Ponçon (amont sur la Durance), Castillon (amont sur le Verdon) et Cadarache (aval de la confluence Durance-Verdon), nous permet d'évaluer l'évolution de la composition minéralogique des MES d'amont en aval en fonction des sources : micas et illites à l'amont de la Durance (peu favorable) avec apports en smectites (favorable) vers l'aval ; forte teneur en CaCO<sub>3</sub> (peu favorable) à l'amont du Verdon et dilution à la confluence Durance-Verdon. La caractérisation des compositions minéralogiques comparées avec celles d'échantillons représentatifs industriels fournit un premier critère de potentiel de valorisation du sédiment. En fonction des résultats d'essais d'aptitudes spécifiques à l'industrie de la terre cuite (cuisson, séchage, résistance...), des mélanges sont envisagés pour se rapprocher des mélanges industriels.

### 7.8.19 (o) Germination, croissance minérale, dissolution/re-précipitation ? Que se passe-t-il lors de la fabrication minérale en système hydrothermal ?

François Martin<sup>1</sup>, Angela Dumas<sup>2</sup>, Martin Mizrahi<sup>2</sup>, Felix G. Requejo<sup>1</sup>, Christophe Le Roux<sup>1</sup>, Pierre Micoud<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Instituto de Investigaciones Fisicoquímicas Teóricas y Aplicadas, La Plata, Argentine

La genèse des minéraux phyllo-silicatés en système hydrothermal fermé ou ouvert, a été expliquée communément par les phénomènes de dissolution/re-précipitation. Ces observations s'appuient sur les très nombreux travaux sur des phyllo-silicates variés (smectites) comme ceux du groupe d'Alain Decarreau et Sabine Petit à Poitiers. Ces auteurs constataient que, lorsque 2 éléments chimiques étaient en compétition lors d'une synthèse pour un même environnement cationique (octaédrique ou tétraédrique), les méthodes spectroscopiques mettaient en évidence que les cations se répartissaient en cluster pour les basses températures (< 200°C) et de façon aléatoire pour des températures de synthèse élevées (> 200°C), aussi bien pour les couches tétraédriques que les couches octaédriques. L'accès au rayonnement synchrotron et notamment l'utilisation de l'absorption des rayons X va nous permettre, au travers de données acquises sur des proto-phyllosilicates de type 2 : 1 et sur leurs descendants phyllosilicates post synthèse, de montrer que la notion de dissolution/re-précipitation n'est peut-être pas le seul phénomène existant lors des synthèses minérales pour expliquer la répartition cationique en fonction de la température.

### 7.8.20 (o) Etudes ab initio des propriétés structurales et vibrationnelles des phyllosilicates, et le problème de l'ordre cationique

Merlin Méheut<sup>1</sup>, Michele Lazzeri<sup>2</sup>, Edwin Schauble<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>IMPMC, Paris

<sup>3</sup>Dept. of Earth, Planetary, and Space Sciences UCLA, Los Angeles, États-Unis

Contrairement aux minéraux de plus haute température, les phyllosilicates, notamment ceux de surface, présentent souvent des cristallinités faibles et des arrangements complexes, rendant leur étude difficile. Les méthodes de calcul de structure électronique basées sur la théorie de la fonctionnelle de la densité, permettent un calcul complet de nombreuses propriétés, notamment structurales et vibrationnelles, de structures cristallines « parfaites ». Elles offrent une alternative intéressante aux méthodes d'étude physique tels la diffraction des rayons X ou la spectroscopie vibrationnelle. Dans ce travail, nous avons calculé les propriétés structurales et vibrationnelles des minéraux : kaolinite, lizardite, talc, pyrophyllite. En comparant les propriétés structurales (distances inter-atomiques) calculées et expérimentales, on observe des désaccords importants, témoignant d'une sous-estimation des incertitudes expérimentales. Les propriétés vibrationnelles mesurées, au contraire, sont en très bon accord avec le calcul. Nous nous sommes également intéressés au calcul de la muscovite, minéral contenant de l'aluminium en substitution tétraédrique désordonnée. La relative simplicité de cette structure en fait un bon "système-test" pour l'étude des effets du désordre sur les propriétés vibrationnelles. Nous avons testé plusieurs arrangements possibles, et nous les avons comparés entre eux et avec les données expérimentales et vibrationnelles. Les résultats obtenus éclairent sur l'ordonnement à courte distance de l'aluminium. En particulier, la forte similarité entre le spectre Raman expérimental de la muscovite avec le

spectre Raman calculé de la configuration « en nid d'abeille » suggère que l'aluminium présente cette organisation à courte distance.

### 7.8.21 (o) Anomalies protoniques et fluorées dans les phyllosilicates 2 : 1

Jean-Louis Robert<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IMPMC, Paris

Les formules structurales des phyllosilicates 2 : 1 sont couramment calculées sur une base  $O_{10}(OH,F)_2$ . Cette approximation suffit le plus souvent. Mais, des déviations importantes aux teneurs en  $OH^-$  ou  $F^-$  ne sont pas rares. La teneur en  $OH^-$  peut être inférieure à 2 puf, voire nulle, comme dans la norrishite  $K(Mn_2^{3+}Li)Si_4O_{10}O_2$  ou l'oxy-annite  $K(Fe_2^{3+}Fe^{2+})(Si_3Al)O_{10}O_2$ . A l'opposé, un excès de protons, jusqu'à 25% est observé dans des micas triocta-dioctaédriques sans aluminium du système  $K_2O-M^{2+}O-SiO_2-H_2O-HF$ , avec  $M^{2+} = Be^{2+}, Mg^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}$ . Dans ce système, il existe une solution solide partielle entre deux pôles :  $K(M_{0,5}^{2+}\square_{0,5})Si_4O_{10}(OH,F)_2$  et un pôle virtuel  $KM_3^{2+}(Si_{3,5}M_{0,5}^{2+})O_{10}(OH,F)_2$ , à cation divalent tétracoordonné. Cette solution est très étendue avec Be, Mg et Ni, et plus restreinte avec Co, pour des raisons stériques. L'association d'un cation divalent tétracoordonné et d'un site octaédrique vacant, en tout point de ces solutions solides, crée un déficit local de charge sur les oxygènes pontants des tétraèdres  $(M^{2+}O_4)^{6-}$ , compensé par l'incorporation d'un proton supplémentaire. Le taux de protons additionnels suit la teneur en cations divalents tétracoordonnés et peut atteindre 25%, conduisant à des formules structurales en  $O_{9,5}(OH)_{2,5}$ . L'analyse thermogravimétrique indique que ces protons supplémentaires sont très fortement liés à la structure. La spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier, dans le domaine de vibration d'élongation des hydroxyles et dans celui des vibrations de la structure silicatée permet de caractériser les distorsions induites par ces protons supplémentaires, avec en particulier une modification des distances Si-O. Dans le système magnésien, l'ajout du fluor, sous forme  $MgF_2$  en proportion respectant la stoechiométrie en Mg, conduit à des micas hyper-fluorés,  $F^-$  pouvant remplacer  $OH^-$  en toutes proportions et sur tous les sites, y compris ceux des protons additionnels, avec des formules structurales en  $O_{9,5}(F)_{2,5}$ .

### 7.8.22 (p) Mineralogy and fluid content of sediments entering the Costa Rica subduction zone - Results from Site U1414, IODP Expedition 344

Delphine Charpentier<sup>1</sup>, Martine Buatier<sup>1</sup>, Steffen Kutterolf<sup>2</sup>, Susanne Straub<sup>3</sup>, Débora Nascimento<sup>4</sup>, Cristina Millan<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Chrono-Environnement, Besançon

<sup>2</sup>GEOMAR, Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, Allemagne

<sup>3</sup>Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, États-Unis

<sup>4</sup>Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brésil

<sup>5</sup>Ohio State University, School of Earth Sciences, Columbus, États-Unis

Offshore Costa Rica, the Cocos Plate subducts under the Caribbean plate forming the southern end of the Middle America trench. A high convergence rate and almost complete subduction of incoming sediments make the Costa Rica margin an extremely dynamic environment. The Costa Rica Seismogenesis Project (CRISP) is designed to understand the processes that control nucleation and seismic rupture of large earthquakes at erosional subduction zones. Site U1414 of IODP Exp.344 was drilled to investigate the material from the incoming Cocos Plate.

A key parameter of incoming plate is mineralogy, and fluid content and release because they impact deformation within the subduction complex. We therefore decided to characterize sediment composition and quantify the different types of water at Site U1414. Mineralogical and geochemical investigations were performed using X Ray Diffraction, Cation Exchange Capacity measurements, carbon analyses and sequenced extractions in NaOH. Fluid characteristics were approached by thermal gravimetric analyses.

The sedimentary sequence can be divided into three major sedimentary units. The first one is a hemipelagic silty clay to clay with a gradual increase of calcareous nannofossils. The dominant minerals are mixed layered clay minerals (I/S and Chl/S) and kaolinite with zeolites. Other minerals like quartz, feldspar and calcite are also present. Small amounts of biogenic opal have been quantified. Unit II is composed of nannofossil-rich calcareous ooze. The proportion of biosilica is variable and can reach 10 wt.%. Unit III is a lithified carbonaceous sandstone with zeolites and opal CT.

Fluid content that can be released for  $T < 500^\circ C$  varies from about 15 wt.% in Unit I to 4 wt.% in Unit III. The presence of smectite yields to fluid release by dehydration and dehydroxylation in Unit I. Release of water by biogenic opal is also observed. It seems to be the main source of fluid in the second unit, whereas in Unit III it is zeolite water.

### 7.8.23 (p) Characterization and origin of clays in non-sulfide Zn ore deposits : example from the Bou Arhous ore deposit (Morocco)

Flavien Choulet<sup>1</sup>, Martine Buatier<sup>1</sup>, Régis Guégan<sup>2</sup>, Luc Barbanson<sup>2</sup>, Aomar Ennaciri<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Chrono-Environnement, Besançon

<sup>2</sup>ISTO, Orléans

<sup>3</sup>Managem, Marrakech, Maroc

Supergene non-sulfide Zn deposits offer high mineralogical diversity including clay minerals that can incorporate significant amounts of Zn like saunonite. In this work, we focus on the Bou Arhous Zn-Pb ore deposit hosted by Lower Jurassic limestone in Eastern High Atlas, Morocco. Zn-rich clayey material fills karstic cavities and two types of clays have been identified on field. White to ocher granular clays are closely associated with supergene willemite (zinc silicate), one of the main Zn bearing mineral phases of the deposit. Red smooth clays filling karst-related cavities cutting across the non-sulfide ore bodies present evidence of stratification that reflects internal sedimentation processes during karst evolution. Bulk chemical analyses reveal that the Zn content highly varies in all clayey samples and can reach several per cents. This enrichment may be due to fine inclusions of zinc silicate or carbonate in the clayey material, or to the occurrence of Zn clays. X-ray diffraction (XRD) analyses complemented by Scanning Electron Microscope (SEM) observations, have allowed us to identify the nature of the clay minerals and to characterize the textural relationships between clays and other zinc-bearing minerals like willemite. In few samples with high zinc content (5%), bulk XRD analyses do not reveal the occurrence of zinc sulphides, carbonates or silicates, suggesting that zinc is associated with clay minerals. Preliminary XRD results indicate that white and ocher clays are composed of kaolinite/smectite irregular mixed layers with up to 20% of smectite in some samples ; smectite, illite and chlorite are also present. On the other hand, the red clays contain kaolinite, chlorite, illite, and illite/smectite mixed layers. SEM observations demonstrated that willemite crystals are partially dissolved and are surrounded by authigenic clay minerals. Microprobe analyses and cation-exchange capacity on clay mineral fractions are currently performed to highlight the localization of zinc within the structure of clay minerals, and to provide crucial information on Zn recovery potential of the studied deposit. All these new results will enable to constrain the interactions between

Zn-rich solutions due to supergene oxidation and residual clays originated from dissolution of limestone-dominated host rocks.

### 7.8.24 (p) Recyclage des briques cassées pour améliorer les propriétés céramiques des argiles plastiques (Meknès, Maroc)

Meriam El Ouahabi<sup>1</sup>, Daoudi Lahcen<sup>2</sup>, Hicham El Boudour El Idrissi<sup>2</sup>, Frédéric Collin<sup>3</sup>, Nathalie Fagel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Argiles, Géochimie et Environnements sédimentaires, Département de Géologie, Liège, Belgique

<sup>2</sup>Laboratoire de Géosciences et Environnement, Département de géologie, faculté des sciences et techniques, Marrakech, Maroc

<sup>3</sup>Laboratoire de Géotechnologies, Liège, Belgique

Dans le Bassin de Saïa (nord ouest du Maroc), les argiles du Miocène de la région de Meknès sont utilisées dans l'industrie céramique locale pour la fabrication des briques. Ces argiles riches en smectite et en carbonates, ont une granulométrie très fine, marquée par la quasi absence de la fraction sableuse. Ces propriétés les rendent très plastiques, ce qui engendre des taux de retrait importants au séchage et à la cuisson et des problèmes de qualité du produit fini qui s'en suivent (fissurations, déformations et casses pendant les processus de séchage et de cuisson).

Dans le but de palier à ce problème et d'améliorer la qualité du produit fini, nous proposons au cours de cette étude de recycler les déchets de briques cassées. Afin d'atteindre ces objectifs, 4 formulations ont été réalisées à base d'argiles plastiques, riches en smectite et des casses de briques broyées. Des quantités de 5, 10, 15 et 20% de briques broyées ont été ajoutées à la pâte destinée à la confection des briques. Des analyses minéralogiques par diffraction des rayons X (DRX), chimiques par spectrométrie de fluorescence (XRF), granulométrique par granulométrie laser, ainsi que les limites d'Atterberg ont été effectuées.

Les résultats minéralogiques montrent une diminution de la teneur en carbonates (calcite) et en argile totale (principalement smectite), lors des ajouts successifs de briques broyées. La fraction sableuse augmente progressivement, jusqu'à atteindre 30% pour une formulation avec 20% de casses de briques. Cette granulométrie plus grossière diminue la plasticité de la pâte et permet d'éviter les déformations et les fissures pendant le processus du séchage. De plus, l'ajout des casses de briques dilue les carbonates, ce qui permet d'améliorer la qualité du produit cuit. Ces résultats indiquent que le recyclage des déchets de briques, présente un intérêt à la fois économique et écologique. Des essais de comportement au séchage et à la cuisson ainsi que des essais mécaniques compléteront cette étude.

### 7.8.25 (p) Detailed study of 7Å and 10Å phyllosilicates in garnierites from New Caledonia : Towards a better understanding of the formation of lateritic Ni hydrous silicate ores

Farid Juillot<sup>1</sup>, Emmanuel Fritsch<sup>1</sup>, Anne-Line Auzende<sup>1</sup>, Gabrielle Dublet<sup>1</sup>, Jean-Louis Robert<sup>1</sup>, Laurent Caner<sup>2</sup>, Daniel Beaufort<sup>2</sup>, Olivier Grauby<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>IMPMC, Paris

<sup>2</sup>IC2MP, Poitiers

<sup>3</sup>CINaM, Marseille

New Caledonian lateritic Ni deposits are associated with obducted Miocene and Pliocene ophiolite complexes (harzburgite ?dunite) and are classified in two types : (1) oxide deposits (dominated by goethite,  $\alpha$ -FeOOH) and (2) hydrous Mg/Ni silicate deposits (dominated by serpentine-like and talc-like minerals and known as « garnierite »)

(Wells et al., 2009 ; Butt and Cluzel, 2013).

Although lateritic weathering is recognized as the only mechanism for the formation of oxide deposits (Butt and Cluzel, 2013), the actual mechanism leading to the formation of hydrous Mg/Ni silicate deposits is more controversial. A downward transport of Ni through the weathering ophiolitic regolith and subsequent precipitation at depth as Mg/Ni phyllosilicates is the most widely accepted mechanism (Butt and Cluzel, 2013). However, an alternative model based on earlier low-temperature hydrothermal events has been suggested by Ducloux et al. (1993) for garnierites from the Bou Azzer ophiolitic complex (Morocco). This possible contribution of hydrothermal events to the formation of hydrous Mg/Ni silicate deposits has also been mentioned by Dubinska et al. (2000) for layer silicates from Lower Silesia and by Talovina et al. (2008) for garnierites from Siberia. These latter studies then emphasize the need for further studies aimed at elucidating the actual mode of formation of the layer silicates that constitute the hydrous Mg/Ni silicate deposits.

In this communication, we will present new detailed mineralogical and crystal-chemistry data obtained on both Ni-rich and Mg-rich sequences of infillings in garnierites from New Caledonia that are compatible with the alternative model for the formation of these hydrous Mg/Ni silicate deposits.

Butt and Cluzel, 2013, Elements, 9, 123-128.

Dubinska et al., 2000, Geol. Sudetica, 33, 85-105.

Ducloux et al., 1993, EJM, 5, 1205-1215.

Talovina et al., 2000, Lith. Miner. Res., 43, 588-595.

Wells et al., 2009, EJM, 21, 467-483

### 7.8.26 (p) Données préliminaires sur les argiles de Fouban (Ouest-Cameroun)

Abiba Abiba Nkalih Mefire<sup>1,2</sup>, André Njoya<sup>3</sup>, Rose Yongue Fouateu<sup>2</sup>, Nathalie Fagel<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>AGEs, Département de Géologie, Liège, Belgique - Belgique

<sup>2</sup>Lab. Métallogénie, Département de Géologie, Université Yaoundé I, Cameroun

<sup>3</sup>IBAF, Université Dschang, Fouban, Cameroun

Cette étude consiste en la cartographie et la caractérisation des matériaux argileux de Fouban (Ouest Cameroun) en vue de leur valorisation dans la fabrication de produits de terre cuites (brique, poterie, tuile). Ainsi deux sites d'argiles alluviales (site S1 Bangourain, site S2 Koutoukpi) situés à une trentaine de kilomètre à l'est ont été échantillonnés. Nous présentons ici les résultats minéralogiques (diffractométrie aux rayons X) et chimiques (XRF) de 6 échantillons dont 4 dans le site S1 et 2 le site S2 et La caractérisation minéralogique des échantillons bruts sur la fraction < 250  $\mu$ m montre que les matériaux argileux des 2 sites sont constitués de minéraux argileux associés au quartz et aux feldspaths (3.16-3.19 Å, 3.20-3.2 Å). La goethite est observée seulement sur les échantillons S1. L'estimation semiquantitative par l'approche basée sur la mesure de la hauteur de pic (count) aux réflexions principales multipliée par un facteur correctif donne 51 à 82 % d'argile contre 8 à 36 % de quartz et 5 à 15 % de feldspaths. La goethite en trace dans le site 1 (<5%), atteint 20% dans l'échantillon BA33. Certains échantillons S1 sont relativement pauvres en quartz (< 15%) par rapport à ceux de S2 (30 et 36%). Les diffractogrammes de rayons X sur les échantillons orientés normaux, chauffés à 500°C (4 heures) et mis dans l'éthylène glycol (22 heures) indiquent que la kaolinite est le minéral argileux dominant (>50 %), on trouve à des proportions variables d'illite, de smectite. L'analyse chimique montre que SiO<sub>2</sub> (45-59%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (22-29%) et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2-11%) sont les constituants majeurs. Les échantillons S1 sont plus riches en en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (23 à 28 %), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (> 7 %) que les échantillons S2 (22-23% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> < 4%). Les échantillons S2 sont systématiquement plus riches en SiO<sub>2</sub> (57 à 58%). Le rapport SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> proche

de 2 (2,06-1,54) du site 1 traduit effectivement sa richesse en kaolinite par rapport au site 2.

Ces données préliminaires montrent que les matériaux étudiés pourraient convenir pour la production des terres cuites. Toutefois, la teneur en fer relativement élevée dans certains échantillons du site 1 pourrait

entraîner des déformations au cours de la cuisson. Des essais complémentaires de caractérisation (physico-chimique, minéralogique et céramique) sont en cours afin mieux évaluer les potentialités des matériaux argileux des 2 sites comme matières premières pour les produits de terre cuite.



## **Thème 8**

# **BioGéosciences et Environnement -** *BioGeosciences and Environment*

Animateurs : Marie-Pierre Isaure (LCABIE-IPREM, Pau), Jeroen Sonke (GET, Toulouse)

## 8.1 Nanoparticules, colloïdes et environnement

### (Nanoparticles, colloids and environment)

#### Responsables :

- Sylvain Grangeon (BRGM, Orléans)  
s.grangeon@brgm.fr
- Philippe Le Coustumer (Université de Bordeaux)  
philippe.le-coustumer@u-bordeaux1.fr
- Alejandro Fernandez-Martinez (ISTerre, Grenoble)  
alex.fernandez-martinez@ujf-grenoble.fr
- Gaëtane Lespès (IPREM/LCABIE, Pau)  
gaetane.lespes@univ-pau.fr
- Serge Stöll (Université Genève)  
serge.stoll@unige.ch

#### Résumé :

Les minéraux nanocristallins naturels (nanoparticules de type oxyde de fer, manganèse, hydroxydes double lamellaires, etc.), les argiles et les colloïdes naturels (par ex. acides humiques et fulviques) possèdent une charge de surface variable et une réactivité chimique évoluant en fonction du contexte géochimique. De fait, ils jouent un rôle prépondérant dans le cycle géochimique de nombreux éléments trace métalliques et organiques, et, en zone polluée, dans le piégeage des polluants métalliques et dans la dégradation des polluants organiques. Les minéraux amorphes et/ou nanocristallins jouent aussi le rôle de précurseurs minéraux dans les processus de bio-minéralisation (par ex. : carbonates et phosphates amorphes, oxydes de fer, etc.), et sont donc des objets d'étude importants pour la compréhension du devenir dans l'environnement. En outre, les nanoparticules de synthèse, de plus en plus utilisées, sont rejetées dans l'environnement sans que leur toxicité et devenir ne soient clairement compris ni maîtrisés.

Les récentes avancées dans la caractérisation structurale de ces objets (par ex. microscopie électronique, diffraction des rayons X, méthodes spectroscopiques sur grands instruments [synchrotron, neutrons]) et de leurs processus d'agrégation, coagulation, floculation en fonction de leur potentiel zêta ont permis de mieux comprendre leur évolution texturale, structurale, leur réactivité chimique et donc leur rôle dans l'environnement.

Cette session se focalisera sur la structure, la réactivité et le devenir dans l'environnement des nanoparticules naturelles et de synthèse, ainsi que sur la relation entre structure et propriétés chimiques (par ex. sorption). Cette session pourra accueillir des études employant des techniques expérimentales et/ou théoriques (par ex. modélisation moléculaire). Des études de terrain et de laboratoire (synthèse, comportement, modélisation) portant sur les nanoparticules, leur impact environnemental et sur l'écotoxicologie, ainsi que la modélisation de leurs mécanismes d'agrégation, coagulation et floculation sont également bien-

venus.

#### Mots-clés :

nanoparticules, nanomatériaux, argiles, colloïdes, structure, réactivité, cristalochimie, géochimie

#### Abstract :

Natural nanocrystalline minerals (iron and manganese oxides, layered double hydroxides, etc.), clays and natural colloids (e.g. humic and fulvic acids) possess a variable surface charge and a chemical reactivity that evolve as a function of the geochemical context. Thus, they play a pivotal role in the geochemical cycle of numerous trace metals and organics and, in polluted areas, in the trapping of trace metals and in the degradation of organic pollutants. Amorphous and/or nanocrystalline minerals also play the role of amorphous precursors in bio-mineralization processes (e.g. amorphous carbonates and phosphates, iron oxides, etc.) and are thus important research subjects for the understanding of the origin and fate of crystalline structures in the environment. Finally, manufactured nanoparticles are increasingly used and released in the environment, although their toxicity and fate are poorly understood. Recent advances in the structural characterization of these objects (e.g. electronic microscopy, X-ray diffraction, spectroscopic methods taking advantage of large facilities [synchrotron, neutron]) and in the understanding of their aggregation, coagulation and flocculation processes as a function of their zeta potential have helped to better constrain their textural and structural evolution, as well as their chemical reactivity, and thus their role in the environment. This session will focus on the structure, reactivity and environmental fate of natural and manufactured nanoparticles, as well as on the relation between structure and chemical properties (e.g. sorption capacities). This session will host experimental and theoretical (e.g. molecular dynamics) studies. Field and laboratory (synthesis, behavior, and modeling) studies focusing on nanoparticles, their environmental impact and on their implication for ecotoxicology, as well as modeling of their aggregation, coagulation and flocculation mechanisms are also welcome.

### 8.1.1 *Keynote communication* : On the edge : Surface reactivity of nanoscale and sub-nanoscale oxide minerals

Jasquelin Peña<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institut des dynamiques de la surface terrestre, Faculté des géosciences et de l'environnement, Université de Lausanne, Suisse*

Adsorption and redox reactions at the water-mineral and microbe-mineral interface govern environmental quality and ecosystem function. In soils and sediments, contaminant and nutrient dynamics are coupled closely to their interactions with nanocrystalline iron and manganese oxides. The extraordinary reactivity of these solid phases is due to their nanoscale dimensions and large number of structural defects.

To determine the formation, structure and reactivity of nanoscale Fe and Mn oxides, we exploit synchrotron-based X-ray absorption and X-ray scattering methods. X-ray absorption spectroscopy provides information about the local coordination environment (within 6 Å) of the element of interest, whereas high energy X-ray scattering probes all pairs of atoms within a coherent scattering domain of up to several nanometers. When combined with wet chemical techniques and insights from computational geochemistry, these X-ray methods yield detailed models of mineral structure and reactivity.

I will present our recent findings on the surface reactivity of d-MnO<sub>2</sub>. This layer-type Mn oxide is characterized by randomly stacked and curled nanosheets, a low to moderate vacancy content, and variable amounts of layer and interlayer Mn<sup>3+</sup>. We use a synergistic experimental-computational approach to investigate the controls on the adsorption of Ni and Cu at the d-MnO<sub>2</sub> nanoparticle edges. I will also describe our use Fe(0) electrocoagulation to create a controlled redox boundary that allows us to produce calcium-oxyanion-Fe(III) polymers. These Fe(III) polymers appear to be widespread in natural environments, but have eluded structural characterization. We deduce the structure of this key Fe(III) phase by combining time-dependent As(V) and P uptake measurements and sequential extractions with As K-edge EXAFS spectroscopy and pair distribution function analysis.

### 8.1.2 (o) Electron mobility and trapping in iron oxide, hydroxide and oxyhydroxide nanoparticles

Benjamin Gilbert<sup>1</sup>, Jennifer Soltis<sup>2</sup>, Adam Schwartzberg<sup>1</sup>, Piotr Zarzycki<sup>3</sup>, Kevin Rosso<sup>4</sup>, R. Penn<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, États-Unis*

<sup>2</sup>*University of Minnesota, Minneapolis, États-Unis*

<sup>3</sup>*Polish Academy of Sciences, Warsaw, Pologne*

<sup>4</sup>*Pacific Northwest National Laboratory, Richland, États-Unis*

The reductive dissolution of iron(III) oxide, hydroxide and oxyhydroxide minerals, such as hematite, goethite, maghemite, and ferrihydrite, is a key component of the environmental iron redox cycle. Iron reduction typically drives dissolution, which thus has a significant effect on the mineralogy and aqueous geochemistry of near-surface aqueous regions, and leads to the mobilization of soluble ferrous iron. We are studying the creation and mobility of iron(II) sites in these minerals by chemical or photochemical interfacial electron transfer. In particular, by sensitizing iron (oxyhydr)oxide nanoparticles with light-activated dye molecules it is possible to create surface iron(II) states on a sub-picosecond timescale and to follow the evolution of these reduced states with time-resolved optical and X-ray methods. We used this approach to characterize the coordination geometry of transient iron(II) sites formed in hematite, maghemite, and ferrihydrite nanoparticles and to measure

the Fe-Fe electron hopping rate.

We performed lattice Monte Carlo simulations of electron hopping-based mobility in model oxide nanoparticles, finding good agreement with transient kinetic data. These simulations predicted that the electrons were mobile through the nanoparticle interior, but that the electron trajectories were biased toward near-surface regions in the presence of a positive electrostatic surface charge. We designed experiments to test these predictions using 6-line ferrihydrite nanoparticles that could be synthesized with tight control of particle size. We performed transient optical absorption studies on the picosecond - to - 0.2-millisecond timescale to test for particle size and solution pH effects on the kinetic trapping of electrons within the nanoparticles. We additionally studied the lifetime of electrons introduced into hematite, goethite and other iron (oxyhydr)oxide phases. The lifetime of iron(II) sites is relatively long (~100 μs) in all phases tested, but is more affected by mineral phase than particle size. These findings appear to support the prediction of the KMC simulations that electron trajectories are strongly biased by surface charge. This work has relevance for understanding mineral and solution chemistry controls on the rates of reductive dissolution.

### 8.1.3 (o) Using the difference pair distribution function technique to probe adsorption reactions on nanoscale minerals

Case Van Genuchten<sup>1</sup>, Jasquelin Peña<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institut des dynamiques de la surface terrestre, Université de Lausanne, Suisse*

Extended X-ray absorption fine structure (EXAFS) spectroscopy is an element-specific technique that is frequently used to investigate the nature of chemical bonding at the solution-mineral interface. However, the ability of EXAFS spectroscopy to probe adsorption reactions can be limited when the absorbing element is present in multiple coordination geometries and binds to weakly scattering atoms, and when multiple scattering contributes significantly to the overall signal. In the past decade, the atomic pair distribution function (PDF), which is derived from total X-ray scattering, has emerged as a powerful technique to characterize the structure of nanoscale materials. The detection of surface complex geometries by the difference pair distribution function (d-PDF), which is obtained by subtracting the PDF of the blank, unreacted mineral from the PDF of the mineral+adsorbed sample, provides an alternative to EXAFS spectroscopy. Among other benefits, the d-PDF yields direct bond distances, increased spatial resolution, concurrent detection of both weakly and strongly scattering atoms, and is sensitive to atomic pairs extending beyond the first few coordination spheres.

In this work, we apply the d-PDF technique to investigate metal (Pb, Cd) and non-metal (Sb, As, P) adsorption reactions with two ubiquitous nanominerals, 2-line ferrihydrite and δ-MnO<sub>2</sub>. We relate differences in ion uptake behavior to differences in the type and fraction of adsorption geometries detected in the d-PDF. We compare experimental data to calculated d-PDFs based on entire virtual nanoparticles with surface-bound ions constructed with crystal visualization software. We end by comparing the advantages and disadvantages of the d-PDF technique and EXAFS spectroscopy as geochemical tools to investigate ion adsorption to nanomineral surfaces.

### 8.1.4 (o) Chrysotile nucleation and growth : What is proto-serpentine ?

Romain Lafay<sup>1</sup>, Alejandro Fernandez-Martinez<sup>1</sup>, German Montes-Hernandez<sup>1</sup>, Anne Line Auzende<sup>2</sup>, Emilie Janots<sup>1</sup>, Agnieszka Poulain<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>IMPMC, Paris

<sup>3</sup>European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble

Chrysotile, one of the most studied asbestos minerals, has been the focus of increasing research due to the interest in developing efficient synthesis protocols that can help addressing natural chrysotile health hazards. Proto-serpentine has been identified as the precursors in serpentine nucleation and growth studies, yet little is known about their structural properties and growth mechanisms, and about the processes controlling proto-serpentine to serpentine mineral formation in natural systems, including questions regarding serpentine species stability domains (lizardite, chrysotile, antigorite, polygonal, conical...).

In this study, we report new insights on the first steps of chrysotile formation at 300°C by using semi-continuous experiments (i.e. sampling of a reacting suspension at different times). Using a combination of macroscopic and microscopic characterization techniques, we have identified the formation of a nanocrystalline precursor (proto-serpentine) during the first 2 hours of reaction, mixed with micrometric brucite. Chrysotile formation from this mixture is effective between 2 and 3 hours of reaction, followed by particle growth via Ostwald ripening and a progressive dissolution of residual proto-serpentine, brucite and silica gel as attested by BET and FESEM measurements [1]. High resolution tools such as HR-TEM and high-energy synchrotron X-ray diffraction and Pair-Distribution Function (PDF) analysis have been used to describe the local order of the nanocrystalline proto-serpentine.

[1] R. Lafay, G. Montes-Hernandez et al. Chemistry - A European Journal (2013) 19, 5417 - 5424.

### 8.1.5 (o) Fixation du sélénium sur la calcite : étude par microscopie à force atomique

François Renard<sup>1</sup>, German Montes-Hernandez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

Le sélénium est un élément important dans la nature à cause de sa haute toxicité dans certains environnements. C'est aussi l'élément pour lequel la différence entre la concentration létale (400 microgrammes/jour) et la déficience (40 microgrammes/jour) est la plus faible pour l'homme. Des observations in-situ par microscopie à force atomique de surfaces de calcite en contact avec des solutions contenant du sélénium sous forme d'oxyanions montrent que cet élément peut être piégé sur et dans la calcite. Des solutions contenant du sélénium sous deux états d'oxydation (Se(IV) ou Se(VI)) ont été mises en contact avec des surfaces de clivage de monocristaux de calcite. La concentration de la solution en calcium et carbonate était contrôlée pour que la calcite se dissolve ou bien précipite. Les observations sont réalisées in-situ, dans une cellule fixée sur un microscope à force atomique. Deux catégories de processus sont observées :

1. Durant la croissance de calcite, le sélénium est incorporé dans des sites spécifiques de la calcite, avec Se(IV) qui montre une incorporation préférentielle par rapport à Se(VI). Cette incorporation est confirmée par des mesures EXAFS.

2. Durant la dissolution de la calcite, la concentration de calcium augmente près de l'interface, dans un film fluide fin, ce qui permet la précipitation d'une nouvelle phase présente sous forme de nanoparticules riches en sélénium. Cette observation met en évidence un nouveau processus de couplage entre dissolution et précipitation qui permet la précipitation d'un minéral à la surface d'un autre minéral, alors que les deux minéraux sont dans des conditions thermodynamiques où ils devraient se dissoudre. Ce mécanisme de dissolution-précipitation étend le domaine de conditions thermodynamiques permettant de piéger le sélénium dans la calcite.

### 8.1.6 (o) Probing the structural organization of humic nanocolloids with cationic surfactant

Abdul Amir Chaaban<sup>1</sup>, Bruno Lartiges<sup>1</sup>, Véronique Kazpard<sup>2</sup>, Célia Plisson-Chastang<sup>3</sup>, Patricia Vicendo<sup>4</sup>, Céline Cailler<sup>5</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Plateforme de Recherche et d'Analyses en Sciences de l'Environnement, Ecole Doctorale des Sciences et Technologies, Faculté des Sciences, Université Libanaise Hadath - Liban

<sup>3</sup>Laboratoire de biologie moléculaire eucaryote du CNRS, Toulouse

<sup>4</sup>Interactions moléculaires et réactivité chimique et photochimique, Toulouse

<sup>5</sup>Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux, Nancy

Humic substances (HS) are operationally defined as fulvic acid (FA), humic acid (HA) and humin according to their solubility at different pHs, formed by the degradation of organic materials (plant debris, bacteria) and condensation of small organic molecules. Molecular and conformational structures of HS represents important object of debate in literatures involving two models of structure : a traditional assumption proposes HS as Polymers (Macromolecule) and the new concept defends a Supramolecular organization. In this study we analyzed the organization of Suwannee river Humic and fulvic Acid in presence of a cationic surfactant Dodecyltrimethylammonium chloride (DTAC). Several structural characterization techniques were used : Turbidity, Dynamic Light Scattering (DLS), Cryogenic Transmission Electron Microscopy and fluorescence spectroscopy. The results of turbidity and DLS determine two dynamics aspects depending on DTAC concentration. Such results can be explained by aggregation process due to reduction of electrostatic repulsion and charge neutralisation followed by molecular rearrangement and cooperative binding of surfactant driven by hydrophobic interaction that was more pronounced for FA than HA ; after the addition of DTAC and according to experimental conditions Cryo-micrograph showed globules accompanied by a thin platelets of small molecule and lamellae with HA While with FA the sequence was negative vesicles, aggregates, positive vesicles and mixed micelles. This demonstrates supramolecular organization and the average characteristic (molecular weight, hydrophilic and hydrophobic domain) can be estimated applying packing parameter of vesicles. The molecular rearrangement was further investigated by fluorescence spectroscopy where new emission peaks were emerged that wasn't feasible in the reference HS indicating major restructurations and exposing of fluorophores further work is in progress in an attempt to isolate chemical groups responsible for the fluorescence property. These interesting results indicate that our studies represent new path for exploring the structure of HS.

### 8.1.7 (o) Suspended particulate matter versus lab-controlled particles reactivity towards metals

Mathieu Le Meur<sup>1</sup>, Emmanuelle Montargès-Pelletier<sup>1</sup>, Laurent Michot<sup>2</sup>, Valérie Briois<sup>3</sup>, Pierre Le Pape<sup>1</sup>, Delphine Vantelon<sup>3</sup>, Renaud Gley<sup>1</sup>, Allan Bauer<sup>1</sup>, Frédéric Villieras<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux, Nancy

<sup>2</sup>Laboratoire de Physicochimie des Electrolytes, Colloïdes et Sciences Analytiques, Paris

<sup>3</sup>Synchrotron SOLEIL, GIF-sur-Yvette

Due to their persistence in the environment and toxicity, metal pollution is a major environmental issue. Among potentially toxic metals, zinc (Zn) is one of the most widespread contaminants. Due to their high reactive surface area, aquatic particles and colloids, referred to as Suspended

Particulate Matter (SPM), play a crucial role in the transport and fate of heavy metals. Natural SPM are composite and complex. In order to better understand the relation between metals and mineral particles, model particles are needed. The general purposes of the presented work are to (i) synthesize lab-controlled particles (ii) characterize the resulting products and compare their properties towards natural SPM (iii) compare natural SPM and lab-controlled particles reactivity towards Zn.

As they are frequently observed in SPM from continental surface waters, illite and iron hydroxide coated-illite (Fe-coated illite) were selected for the study of interactions between metals and particle surfaces. Illite was purified, homoionised with sodium cations and size fractionated. Fe-coated illite was prepared by gentle hydrolysis of iron nitrate in presence of illite platelets, using different Fe :illite ratios and various hydrolysis kinetics.

TEM-EDXS microanalyses revealed (i) that pristine illite particles display a mean size of 20 nm, (ii) the presence of well-defined iron-hydroxide coatings, after iron hydrolysis experiments and (iii) that illite composition was preserved through the Si :Al and Si :K ratios. Those synthetic Fe-coated illites were compared to different river SPM in terms of surface area, surface charge, and Zn sorption. Those analyses evidenced a strong affinity of illite for Zn, especially at low concentrations, apparently independent of the N<sub>2</sub> surface area. Moreover, Zn-bonding onto the different natural and synthetic particles was studied using X-ray absorption spectroscopy at the Zn-K edge, and this for different Zn loadings selected from the batch experiments.

### 8.1.8 (o) Particle characterization and trace metal speciation in the surface water of the Pasig River during sediment remobilization (caused by dredging)

Jessica D. Villanueva<sup>1</sup>, Philippe Le Coustumer<sup>1</sup>, Serge Stoll<sup>2</sup>, Mikael Motelica-Heino<sup>3</sup>, Nicolas Peyraube<sup>3</sup>, Frederic Huneau<sup>4</sup>, Ronald Materum<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Géoresources & Environnement, Pessac

<sup>2</sup>Institute Forel, University of Geneva, Environmental Physical Chemistry, Versoix, Suisse

<sup>3</sup>ISTO, Orléans

<sup>4</sup>Université de Corse Pascal Paoli, Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire d'Hydrogéologie, Corte

<sup>5</sup>University des Philippines, UP Diliman, Quezon City, Philippines

The Pasig River situated in a highly industrialized and urbanized area in Manila, Philippines, needed to undergo dredging. This activity caused remobilization of particle-bound contaminants from re-suspended sediments. The induced activity then can entail possible harm on the aquatic system. In this study the fate of the trace metals (Cd, Co, Cu, Cr, Ni, Pb, Zn) both in total and labile fractions were determined. Hydrochemistry was also applied to describe the aqueous system during the activity. Physico-chemical parameters were determined and particles were characterized.

The water is near anoxia as the dissolved oxygen ranges from 0.45 to 1.05 mg/L. pH is 7.89 to 8.32 and the ionic strength is 0.1392 to 0.3680 M. The results showed that significant amount of trace metals were present in both forms. Mean concentration in total fraction is as follows Cd : 172 µg/L, Co : 0.32 µg/L, Cr : 48 µg/L, Cu : 172 µg/L, Ni : 0.57 µg/L, Pb : 2.53 µg/L, and Zn : 38 µg/L, while, the labile fraction gave mean concentrations : Cd : 0.09 µg/L, Co : 0.05 µg/L, Cr : 0.22 µg/L, Cu : 0.17 µg/L, Pb : 0.11 µg/L, Ni : 0.26 µg/L, and Zn : 0.91 µg/L. Total organic carbon (TOC) ranges from 3 to 4.52 mg/L. TOC is directly proportional to the particle number concentration (2223 to 4221 particles/mL). Also with these two parameters, the maximum values are both found in the midstream section. Particle mass concentration gave

values from 0.38 to 1.62 µg/L. Mean particle size range is 202 to 745 nm. Zeta Potential (ζ) is -14 to -11 mV.

### 8.1.9 (o) Stabilité et toxicité de nanoparticules d'argent enrobées de silice dans une eau minérale

Clément Levard<sup>1</sup>, Ester Artells<sup>2</sup>, Melanie Auffan<sup>1</sup>, Alain Thiéry<sup>2</sup>, Perrine Chaurand<sup>1</sup>, Julien Issartel<sup>2</sup>, Jérôme Rose<sup>1</sup>, Jerome Labille<sup>1</sup>, Armand Masion<sup>1</sup>, Jean-Yves Bottero<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix en Provence

<sup>2</sup>Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale, Aix-en-Provence

Les nanoparticules d'Ag (nano-Ag) ont fait l'objet de nombreuses études du fait de leurs propriétés antibactériennes et optiques qui sont largement exploitées dans un certain nombre de produits commerciaux (textiles, revêtement de surface...). Le relargage de ces nanoparticules dans l'environnement présente un danger potentiel pour les écosystèmes même si un nombre croissant d'études montre que ces nanoparticules se transforment rapidement limitant ainsi leur toxicité (sulfuration de l'argent par exemple). Dans le but de limiter ces transformations, les nano-Ag sont parfois recouvertes d'un enrobage inorganique de SiO<sub>2</sub>. Ceci permet notamment de ralentir l'oxydation de surface et ainsi préserver les propriétés optiques des nano-Ag par exemple. A notre connaissance la stabilité des nano-Ag recouvertes de silice a très peu été étudiée d'un point de vue environnemental. On peut penser que cette couche de silice va plus ou moins ralentir les cinétiques de transformation des nano-Ag (oxydation/dissolution, sulfuration...).

Dans ce contexte, notre projet a pour but d'étudier la stabilité des nano-Ag recouvertes de silice (avec des structures variables) dans différents milieux environnementaux. Un des objectifs sera d'étudier leur solubilité et leur toxicité en comparaison avec des nano-Ag recouvertes d'un enrobage organique (polyvinylpyrrolidone) qui sont largement utilisées dans de nombreuses applications. Des premiers résultats sur la stabilité et la toxicité des nano-Ag dans une eau minérale (Volvic) seront présentés.

Ce projet s'inscrit dans le cadre du labex SERENADE (Safe(r) Eco-design Research and Education applied to Nanomaterial Development) qui a pour but de créer un réseau entre industriels et laboratoires académiques afin de concevoir des nanomatériaux qui soient plus sûr pour l'homme et l'environnement.

### 8.1.10 (o) Differential toxicity of aluminum nano-phases

Armand Masion<sup>1,2,3</sup>, Catherine Santaella<sup>4</sup>, Laetitia Shintu<sup>5</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix en Provence

<sup>2</sup>iCEINT, Aix en Provence

<sup>3</sup>SERENADE, Aix en Provence

<sup>4</sup>LEMIRE, CEA Cadarache, St Paul lez Durance

<sup>5</sup>Institut des Sciences Moléculaires de Marseille, Marseille

Aluminum toxicity is usually attributed to dissolved species in general and the Al<sub>3+</sub> hexa-aquo ions in particular. Indeed, the « free » ions are the main concern whereas complexed Al is less toxic. Regarding non dissolved, there appears to be a general consensus that Al in solid phases does not pose any toxicity problems. However, these claims are based on the study of « large » objects (i.e. µm sized or larger), but very little is known about the toxicity of nano-sized Al phases.

We examined the toxicity of two Al nanophases, viz. nano-boehmite and the Al<sub>13</sub> tridecamer, a nano-sized Al polymer. Boehmite is a common Al oxyhydroxide ; it is considered as non toxic. In a first approximation,

nano-boehmite is also considered as harmless, by analogy with the larger sized counterpart.

There are only isolated reports of the occurrence of Al13 in natural environments. It is a hydrolysis product of Al3+ and is frequently used in water treatment processes, and may thus enter ecosystems using this route. As a matter of fact, typical Al concentration used in drinking water plants were also used here. The Al13 species is known to exhibit severe toxic effects towards crops.

Nano-boehmite as well as Al13 exhibit toxic effects toward *P. Brassicacearum* and *E. Coli*. Oxidative stress is a likely mechanism. Indeed, the *E. Coli* sodAsodB double mutant showed increased sensitivity to Al stress compared to the wild strain. A remarkable point is the amplitude of the responses which differs greatly whether AlOOH or Al13 is present in the medium. With *P. Brassicacearum*, the toxic effects in terms of survival rate observed with nano-boehmite occur also in the presence of Al13 at concentrations lower by 2 orders of magnitude. With *E. Coli*, the same trend was observed. In this case, the increased sensitivity of the superoxide dismutase deficient strains was evident from the lowest tested concentrations (0.1mM).

The evolution of the Al speciation occurred on a timescale incompatible with NMR analyses. Ferron based determinations showed however that the Al13 nanoparticle becomes undetectable in the growth medium within 90 minutes. Proton NMR based metabolomics suggest that distinct metabolic routes are affected by nano-boehmite and Al13.

### 8.1.11 (o) Role of physicochemical characteristics of metal oxide nanoparticles in their toxicity and mobility in natural soils

Jean Martins<sup>1</sup>, Marie Simonin<sup>2</sup>, Gaëlle Uzu<sup>1</sup>, Aline Navel<sup>1</sup>, Sophie Sebastianutti<sup>1</sup>, Agnès Richaume-Jollion<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LTHE, Grenoble

<sup>2</sup>Ecologie microbienne, Lyon

Important amounts of metal oxide nanoparticles such as TiO<sub>2</sub> or CuO are being chronically released into the environment, through sewage-sludge applications to soils as fertilizers. Information regarding the impact of a realistic concentration of NP on soil organisms is currently limited and the importance of soil characteristics is often neglected in ecological risk assessment. As yet, there are few data on transport of NP through soils, and hence characterization of NP behavior and associated potential bioavailability remains to be elucidated. Extrapolation of results from one contaminated soil to another is difficult because of the great variability of soils. Thus establishing the relationships between soil properties and (i) NP behavior and (ii) ecotoxicity is urgently needed in order to evaluate the vulnerability of soils. Using 6 contrasted soils, we characterized the size and surface charge of TiO<sub>2</sub>-NP and CuO-NP in soil solutions and we studied their transport in soil column experiments. In addition, we assessed the response of soil microorganisms in a 90 days microcosm experiment, where the 6 soils were exposed to a realistic concentration or an accidental spiking of NP (1 and 500 mg.kg<sup>-1</sup> dry soil). Soil respiration and microbial activities of the N cycle were measured, in order to assess the effect of the NP on soil functioning. Microbial abundance of bacteria, nitrifying and denitrifying microbial communities were also determined by quantitative PCR targeting 16S rRNA and functional genes (*amoA*, *nirK*, *nirS*). We found that soil properties, especially pH and ionic strength, can influence the aggregated size and surface charge of the two NP. In the column experiments, we observed that the NP exhibited very different transport capacities depending on the clay content of the soil. Contrarily to CuO-NP, TiO<sub>2</sub>-NP had no impact on microbial communities in most soils, except in a silty-clay soil (high OM) where microbial activities and abundances were significantly lowered, with both a realistic and accidental NP concentration. Altogether, our results demonstrate

the importance of assessing the impact of a realistic concentration of NP in different soils and the relevance of NP characterization in realistic conditions such as soil solutions, in order to get a better assessment of the impact of these NP on soil functioning.

### 8.1.12 (o) Nanomagnétisme environnemental et pollution urbaine atmosphérique dans la ville de Toulouse

Méline Macouin<sup>1</sup>, Sonia Rousse<sup>1</sup>, Plinio Jaqueto<sup>2</sup>, Ricardo Trindade<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Departamento de Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Brésil

La présence de particules en suspension dans l'air a été reliée à une multitude de problèmes de santé dépendant de leurs sources et de leurs tailles. Les propriétés magnétiques des poussières atmosphériques représentent un moyen économique et intéressant pour le suivi et le traçage des particules polluantes dans l'air tant dans le temps que dans l'espace, basé sur la forte relation qui existe entre métaux lourds et composés organiques volatiles.

Nous présentons ici une étude sur les écorces de Platanes (*Platanus acerifolia*) comme enregistreur de la pollution urbaine. L'exemple étudié ici est la ville de Toulouse (France) qui présente de nombreux axes de circulation bordés par des platanes. Environ 220 échantillons d'écorces ont été prélevés à 0,5 et 1,5 m de haut le long de trois grands axes de circulation. La susceptibilité massique et l'aimantation rémanente isothermale (IRM) acquise à 1 Tesla montrent une relation avec l'intensité du trafic routier ainsi qu'avec la distance à la route, et permettent ainsi une cartographie à haute résolution spatiale.

Les paramètres d'hystérésis, les acquisitions d'IRM, les observations microscopiques (MEB) et les diagrammes de FORC indiquent la présence de plusieurs familles de magnétite. Les grains les plus grossiers proviennent probablement de l'abrasement des freins sur les véhicules, tandis que les particules magnétiques plus fines, de taille nanométrique, semblent résulter de la combustion dans les moteurs. Plus largement, nous discuterons du magnétisme environnemental comme traceur des nanoparticules d'origine anthropique.

### 8.1.13 (o) Toxicity of silver (ionic and nanoparticle) on phototrophic biofilm

Aridane G. Gonzalez<sup>1,2</sup>, Stéphane Mombo<sup>2</sup>, Lidia Fernandez-Rojo<sup>1,2</sup>, Joséphine Lafflaive<sup>2</sup>, Alexandre Lamy<sup>2</sup>, Oleg Pokrovsky<sup>1</sup>, Jean-Luc Rols<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>EcoLab, Toulouse

Silver is one of the most toxic metals for aquatic biota although it is relatively rare in aqueous systems. Silver can be found both as nanoparticles (AgNPs) and ionic form (Ag<sup>+</sup>) in the natural environment. Benthic phototrophic biofilm is the first biological surface that accepts the impact of pollutants in aquatic systems. Natural biofilms are microbial aggregates on solid substrates composed of heterotrophic and phototrophic microorganisms embedded in an extracellular polymeric matrix basically formed by exopolymeric substances (EPS). The present study addresses the effect of AgNPs and AgNO<sub>3</sub>, used from 0.1 to 100 µg L<sup>-1</sup> of Ag, on two samples of biofilms harvested in a Rotating Annular Bioreactor (RAB), a mesocosm environment simulating the natural conditions found in rivers.

Two independent experiments were carried out, one for silver nanoparticles (AgNPs) and the other for ionic silver (AgNO<sub>3</sub>), and the biofilm structure has been independently characterized for each experiment. The

biofilms were initially dominated by three classes of algae : Chlorophyceae, Cyanophyceae and Diatomophyceae. These three classes were represented by : Chlamydomonas sp., Scenedesmus ecornis, Scenedesmus spinosus, Heteroleibleinia sp., Leptolyngbya margaretheana, Achnanthes exigua and Diatoma moniliformis.

The dry biomass did not decrease in the presence of Ag<sup>+</sup> and it means that the surface of the biofilm is replacing the loss of Diatomophyceae and Cyanophyceae by Chlorophyceae. Accordingly, Ag<sup>+</sup> was poisoning the superficial species on the biofilm, formed by diatoms and cyanobacteria, while keeping these habitats for Chlorophyceae. The toxicity of AgNPs was due to small particles (20 nm) that can pass through the cell wall and reach the plasma membrane. Besides, after adsorption, AgNPs could produce ionic Ag and reactive oxygen species that also invoke cell damages.

In addition to biofilm culture experiments, we studied single-axenic cultures of three species in traditional batch experiments : Uronema confervicolum (green alga), Nitzschia palea (diatom) and Leptolyngbya sp. (Cyanobacteria) in order to find species capable to accumulate AgNPs that can be potentially used as detoxificant under polluted conditions.

### 8.1.14 (o) Assessing the heteroaggregation of manufactured nanoparticles with naturally occurring suspended particulate matter and dissolved organic matter

Jerome Labille<sup>1</sup>, Danielle Slomberg<sup>1</sup>, Nicole Sani-Kast<sup>2</sup>, Patrick Ollivier<sup>3</sup>, Olivier Radakovitch<sup>1</sup>, Jonathan Brant<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>ETH Zurich, Suisse

<sup>3</sup>BRGM, Orléans

<sup>4</sup>University of Wyoming, Department of Civil and Architectural Engineering, Laramie, États-Unis

To study and predict the fate of engineered nanoparticles (ENP) in surface water, relevant environmental conditions should be applied, regarding both the system composition and the ENP concentration. This is likely to favour the heteroaggregation of ENPs with naturally occurring colloids. In this work, we studied these interactions in natural surface waters from river (Rhône river, France) and lake (Cholet, France) displaying contrasted organic and inorganic compositions. TiO<sub>2</sub> nanoparticles were spiked in these systems, and the kinetics of heteroaggregation was assessed. A mechanistic approach was also followed with synthetic water of comparable composition in order to better understand the driving factors.

It appeared that, depending on the solution physical-chemistry (pH, ionic strength, dissolved organic matter) and the occurrence of suspended particulate matter, ENPs show a significant affinity for the colloids which leads to rapid heteroaggregation of the system and sedimentation of the aggregates formed. The concentration ratio between ENP and colloids, appears highly determining for this mechanism, a critical ENP concentration for heteroaggregation being evidenced in synthetic system.

These data, coupled to a fate model, will enable to deliver a probability ranking of the potential scenarios on the fate of ENPs in natural aqueous systems at the river scale.

This work was conducted in the frame of NANOHETER program, ERA-NET SIINN Call 2012.

### 8.1.15 (o) Fate of AgNPs in sewage sludge after application on agricultural soils

Ana Pradas<sup>1</sup>, Ralf Kaegi<sup>2</sup>, Alejandro Fernandez-Martinez<sup>1</sup>, Marie Carriere<sup>3</sup>, Catherine Santaella<sup>4</sup>, Géraldine Sarret<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>Eawag, Particle Laboratory, Dübendorf, Suisse

<sup>3</sup>Laboratoire Lésions des Acides Nucléiques, Grenoble

<sup>4</sup>LEMIRE, CEA Cadarache, St Paul lez Durance

Silver NPs (AgNPs) are one of the most prevalent metallic nanoparticles in consumer products due to their antimicrobial activity. However they are easily leached from them, for example from clothes during laundry washing, then ending in the wastewater treatment plants (WWTP). More than 90% of wastewater Ag-NPs are retained in sewage sludge. In France, 90% of sewage sludge is applied on agricultural soils as a fertilizer. Recent studies have identified silver sulfide (Ag<sub>2</sub>S) NPs as major Ag species in sludges but neither its structural characteristics (such as size and crystallinity) nor its fate and transport in amended soils have been studied. The objective of this work was to characterize the fate of AgNPs in a sludge produced in a pilot WWTP, and then in a sludge-amended soil cultivated with mono and dicot plant species with agricultural interest, using realistic Ag concentrations (1.8 and 40 ppm Ag).

The speciation of Ag was studied in the original sludge, in the amended soil before and after plant culture, and in plant samples by Ag K-edge bulk XANES and EXAFS spectroscopy. In parallel, the sulfidation of Ag NPs was studied in a model system, and the crystallinity and solubility of nano-Ag<sub>2</sub>S produced was studied. The bioavailability of Ag in the amended soil and the influence of plant growth were investigated by the extraction of pore water solution from the rhizosphere. Total Ag content in the different samples were measured by ICP-MS, and phytotoxicity markers were also monitored.

The results of this study will help to assess the risk associated to the use of Ag NPs in consumer products and to the application of sewage sludge on agricultural soils.

### 8.1.16 (o) Effect of natural organic matter on the behavior of manufactured TiO<sub>2</sub> nanoparticles in aquatic systems

Frédéric Loosli<sup>1</sup>, Serge Stoll<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Genève, Institut F.-A. Forel, Versoix, Suisse

Stability of manufactured TiO<sub>2</sub> nanoparticles in presence of natural organic matter (NOM) is investigated by studying the effect of pH, electrolyte valency and concentration as well as NOM concentration. To study the TiO<sub>2</sub> nanoparticle aggregation, disaggregation and stabilization, dynamic light scattering and electrophoretic experiments were used to measure the z-average hydrodynamic diameters and zeta potentials values. Interaction of humic acids and alginate, which represent two major classes of aquatic system compounds, with TiO<sub>2</sub> nanoparticles strongly modify the fate of the particles. Depending on the physico-chemical conditions (pH, ionic strength, electrolyte valency) prevailing in the systems as well as the nanoparticle intrinsic properties (size, shape, surface chemistry) the nanoparticles can enter the aquatic environment either as individual or as aggregated particles. The TiO<sub>2</sub> surface charge can be positive, neutral or negative whereas both natural polyelectrolytes exhibit a negative structural charge. Thus possible adsorption of NOM onto the nanoparticle surface can respectively promote their aggregation, contribute to their disaggregation or maintain them as disperse particles. Electrostatic forces, and to a less extend steric hindrance and van der Waals interactions, were found to play an important role when considering nanoparticles-NOM interaction processes. TiO<sub>2</sub> nanoparticle fate and behavior are found strongly dependent on the electrostatic scenario and on TiO<sub>2</sub> over NOM concentration ratio. Environmental aquatic concentration of humic acids and alginate largely modify the manufactured TiO<sub>2</sub> nanoparticle stability.

### 8.1.17 (o) Role of natural organic matter in fate of titanium dioxide nanoparticles in lake water

Danielle Slomberg<sup>1</sup> Jérôme Labille<sup>1</sup>, Patrick Ollivier<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>2</sup>BRGM, Orleans

Despite continual progress in the development of engineered nanoparticles (ENPs), their fate and impact on the natural environment remain largely unknown due to challenges in detection and quantification. New strategies are thus necessary to more accurately assess ENP hazard and exposure. Titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) NPs are of specific interest due to their use in a wide range of commercial products. The fate of TiO<sub>2</sub> NPs in aqueous environments depends on pH, ionic strength, and suspended particulate matter (SPM) concentration, however a lack of understanding regarding the behavior of these NPs in natural systems remains, especially at relevant concentrations ( $\mu\text{g/L}$  range) where homoaggregation is less favored. Herein, we present the fate of TiO<sub>2</sub> NPs in natural waters from a lake (Cholet, France) with high natural organic matter (NOM) and low mineral SPM. The holistic approach presented here studies the fate of TiO<sub>2</sub> NPs under relevant concentrations in natural lake water by characterization of their physical-chemical interactions (e.g., dispersion or heteroaggregation) with natural suspended matter (NSM), measured using light scattering and nanoparticle tracking analysis. The natural waters were evaluated for pH, ionic strength, NOM content, and elemental composition to elucidate the key contributors to NP fate. The kinetics of NP-NP and NP-NSM interactions were evaluated, as well as and the respective sticking efficiencies for homo- and heteroaggregation. Overall, this holistic approach details TiO<sub>2</sub> NP-NSM interactions pertinent to effective ENP risk assessment within natural surface waters.

### 8.1.18 (o) Nanoparticules et colloïdes dans les sols : comment répondre au défi analytique ?

Gaetane Lespes<sup>1</sup>, Martine Potin-Gautier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LCABIE-IPREM, Pau

La caractérisation en taille et en composition élémentaire dans le continuum de taille est un prérequis indispensable pour identifier les particules colloïdales et comprendre comment elles contribuent au transport des éléments trace dans les sols fortement impactés par les activités humaines. Cependant, l'appréhension de ces éléments dans la phase colloïdale s'avère être bien souvent un véritable défi analytique. Parmi les stratégies analytiques possibles, les techniques couplées apparaissent être séduisantes car offrant intrinsèquement la possibilité d'une caractérisation dimensionnelle et élémentaire fiable et rapide. Dans ce champ métrologique, le couplage entre le Fractionnement Flux-Force (FFF) et plusieurs détecteurs complémentaires en concentration (ultraviolet, UV et spectromètre de masse atomique, ICPMS) et en taille (diffusion de la lumière multi-angle, MALS) s'est avéré pouvoir répondre à ces attentes.

Dans le présent exposé, nous proposons d'aborder le couplage FFF-multidétection au sein d'une méthodologie multitechnique faisant appel à plusieurs types de couplages. Cette approche de caractérisation multidimensionnelle sera illustrée au travers de différents exemples concernant les phases colloïdales de sols, notamment. Dans ces milieux, les nanoparticules naturelles et/ou d'origine anthropique ont pu être caractérisées et leur comportement (mobilisation, agrégation, migration) a été étudié en fonction des conditions environnantes. Un focus particulier sera donné aux éléments trace associés, tels que cuivre, arsenic,

plomb ou uranium.

### 8.1.19 (p) Elaboration de biohybrides HDL@Pseudomonas sp. strain ADP pour des applications en biodépollution

Vanessa Prevot<sup>1</sup>, Matilte Halma<sup>1</sup>, Christine Mousty<sup>1</sup>, Claude Forano<sup>1</sup>, Pascale Besse-Hoggan<sup>1</sup>, Martine Sancelme<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut de Chimie de Clermont-Ferrand

La Pseudomonas sp. ADP (ADP) est une bactérie capable de minéraliser l'atrazine. Cet herbicide, est très résistant et constitue une source de pollution des sols et des eaux souterraines<sup>1,2</sup>. Les Hydroxydes Doubles Lamellaires (HDL) aussi appelés argiles anioniques sont des matrices lamellaires constitués de feuillets brucitiques, au sein desquels la substitution d'une partie des cations divalents par des cations trivalents conduit à la présence de charges positives à la surface des feuillets, contrebalancée par la présence d'anions hydratés dans le domaine interlamellaire. De part leurs propriétés de surface, les HDL apparaissent comme des matrices de choix pour l'immobilisation de biomolécules ou mêmes de cellules entières. Dans cette étude, l'élaboration de biohybrides ADP@HDL, associant composante inorganique et bactéries a été réalisée ainsi que l'étude de leurs performances vis-à-vis de la biodégradation de l'atrazine. Les biohybrides ont été préparés par différentes méthodes de chimie douce : adsorption et coprécipitation. En fonction du procédé choisi, les composés se présentent soit sous la forme d'agrégats ou de gel plus facile à manipuler et à mettre en forme. Ces derniers sont obtenus par coprécipitation de la phase inorganique à partir de sels métalliques directement en présence de bactéries dans le milieu réactionnel. L'encapsulation des bactéries dans un réseau plaquettaire a pu être mise en évidence et la viabilité et la croissance des cellules au sein des matrices HDL ont étudiées. Il s'avère que l'activité des bactéries pour la biodégradation de l'atrazine est fortement améliorée après immobilisation dans les HDL. De plus contrairement aux bactéries libres, les bactéries immobilisées présentent une grande stabilité, sont facilement récupérables et réutilisables, leur activité étant maintenue même après 4 cycles de dégradation.

### 8.1.20 (p) Characterization and toxicity evaluation of iron oxide in a silica matrix for removing arsenic ions from aqueous solutions

Simona Liliana Iconaru<sup>1,2</sup>, Mikael Motelica-Heino<sup>2</sup>, Régis Guégan<sup>2</sup>, Alina Mihaela Prodan<sup>3</sup>, Philippe Le Coustumer<sup>4</sup>, Carmen Steluta Ciobanu<sup>1</sup>, Daniela Predoi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Institute of Materials Physics, Magurele, Roumanie

<sup>2</sup>ISTO, Orléans

<sup>3</sup>Emergency Hospital Floreasca, Bucuresti, Roumanie

<sup>4</sup>Géoresources & Environnement, Pessac

The aim of this study was to synthesize new porous nanoparticles based on iron oxide nanoparticles in a silica matrix (Si :IO-NPs) by polymerizing triethoxysilane inside an aqueous sol of iron oxide nanoparticles (IO-NPs). The morphological and compositional analysis of Si :IO-NPs were investigated by X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM) equipped with an energy dispersive X-ray spectrometer (EDS). Removal experiments of arsenic ions were carried out in aqueous solutions with controlled concentration of arsenic at a fixed pH value of 5 and

7 respectively. For all tested concentrations, the Si :IO-NPs proved to be not cytotoxic on osteoblast cells. The in vitro biological effects of Si :IO-NPs nanoparticles were analyzed by cell proliferation. The toxicity of Si :IO-NPs after removal experiments of arsenic ions was also evaluated by histopathological analysis after 48 h and one month from the intratracheal instillation of As-Si :IO-NPs in physiological saline solution. On the other hand, our results demonstrate that the new porous Si :IO-NPs can be used as an adsorbent for removing arsenic ions from aqueous solutions.

Acknowledgements : The work has been funded by the Sectoral Operational Programme Human

Resources Development 2007-2013 of the Ministry of European Funds through the Financial Agreement POSDRU/159/1.5/S/134398.

### 8.1.21 (p) Suspended particulate matter composition in continental water during low flow and high flow

Mathieu Le Meur<sup>1</sup>, Emmanuelle Montargès-Pelletier<sup>1</sup>, Laurence Mansuy-Huault<sup>1</sup>, Allan Bauer<sup>1</sup>, Renaud Gley<sup>1</sup>, Catherine Lorgeoux<sup>2</sup>, Frédéric Villieras<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LIEC, Nancy

<sup>2</sup>GéoRessources, Nancy

Suspended Particulate Matter (SPM) from continental surface waters, in both the particulate and colloidal fractions are recognized to play a crucial role in the transport and fate of numerous elements, including anthropogenic contaminants. Natural river SPM can be constituted of individual phases as well as of complex and heterogeneous composite aggregates with mineral, and/or organic and/or microbiological constituents.

One purpose of the presented work is to follow how the nature and composition of SPM evolve along the river linear and upon varying flowing conditions and seasons. SPM were collected along the Moselle river (North East of France), at eight distinct stations, selected on the basis of the land use following and following and urbanization gradient. In order to get a quantitative and representative sample, field continuous flow centrifugation was used. SPM samples were then characterized in terms of size-grain distribution, elemental composition (ICP-AES and ICP-MS), mineralogy (XRD, TEM-EDXS), and organic constituents (Py-GCMS).

Mineralogical identification revealed that in the upstream part of the Moselle watershed, phyllosilicates (Illite) are the main constituents of SPM. In the downstream part, SPM analyses revealed the increase of Ca and the occurrence of different iron phases (magnetite, hematite), traducing respectively the geological background and the iron-based human activities. Chemical analyses revealed that heavy metals are ubiquitous. Zinc contents in SPM increase with the urbanization level and during low flow periods. Although Zn was detected in all pristine river samples, the metal carriers could not be identified through electron microscopies (only for one SPM sample). Py-GCMS was useful to finely characterize macromolecular organic matter and particularly lignin and fatty acids in order to compare the different stations and to fingerprint the different sources of particular organic matter in the Moselle river.

### 8.1.22 (p) Photoreduction of $\delta$ -MnO<sub>2</sub> probed by time resolved pump-probe spectroscopy

Francesco Femi Marafatto<sup>1</sup>, Matthew L. Strader<sup>2</sup>, Julia Gonzalez-Holgüera<sup>1</sup>, Adam Schwartzberg<sup>3</sup>, Benjamin Gilbert<sup>4</sup>, Jasquelin Peña<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut des dynamiques de la surface terrestre, Faculté des géosciences et de l'environnement, Université de Lausanne, Suisse

<sup>2</sup>Beam Line Development, National Accelerator Laboratory, Menlo Park, États-Unis

<sup>3</sup>Molecular Foundry, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, États-Unis

<sup>4</sup>Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, États-Unis

Birnessite minerals are among the most widespread Mn oxides in the environment. Birnessites are key players in the biogeochemical cycle of nutrients, trace elements and toxic pollutants due to their large surface areas, elevated redox potentials and structural defects in the form of vacancies. In the ocean water column, the speciation of Mn is largely controlled by the photoreductive dissolution of Mn oxides. However, molecular-scale investigations on the mechanisms of Mn oxide photo-reduction have never been carried out.

In this study, we investigated the photoreduction of  $\delta$ -MnO<sub>2</sub>, a synthetic analog of natural birnessites which is 2-3 layers thick and ca. 5 nm across on the ab plane. Experiments were carried out under 400 nm photoexcitation on the hour to day timescale with a LED photoreactor setup and on the pico- to microsecond timescale with optical pump-probe and synchrotron based laser pump / X-Ray probe spectroscopy. The laboratory-based experiments showed irreversible reduction of Mn upon irradiation, with reduced Mn trapped as Mn(III)-pyrophosphate. The difference X-ray absorption spectra ( $\Delta$ XAS) collected at the Mn K-edge show the formation of a transient reduced Mn species within 50 ps and the appearance of a fine structure within 600 ps. The optical pump-probe experiments are consistent with the  $\Delta$ XAS data and suggest a long lived (up to 20  $\mu$ s) reduced Mn state. X-ray diffraction patterns and high resolution transmission electron microscopy images collected on samples before and after laser irradiation show an increased stacking of octahedral layers in the latter.

The results can be summarized by a model in which : 1) photoexcitation of  $\delta$ -MnO<sub>2</sub> results in the formation of Mn(III) in the layer ; 2) Mn(III) in the layer migrates to the interlayer and 3) the migration of Mn(III) in the interlayer promotes layer stacking. The source of electrons responsible for Mn reduction is being investigated with complementary experiments in the presence of radical scavengers.

### 8.1.23 (p) Surface charge and stability of CeO<sub>2</sub> nanoparticles in natural water

Olena Oriekhova<sup>1</sup>, Serge Stoll<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Genève, Institut F.-A. Forel, Versoix, Suisse

Engineered nanoparticles are widely incorporated into a large number of consumer products due to their specific physico-chemical properties in comparison to bulk materials. Cerium dioxide nanoparticles (CeO<sub>2</sub>) are currently used in several applications : as a component of catalytic converters, as a UV blocking or polishing agent or as a diesel fuel additive. The fate of engineered nanoparticles in the aquatic environment is highly dependent on their aggregation, transport and surface chemistry. Interaction with natural organic matter (NOM) and solution chemistry are expected to play an important role in the behavior of nanoparticles in natural water. In our work we investigated the fate of cerium dioxide nanoparticles (JRC NM-212) in various models of natural waters. In particular, we adjusted the composition of some solutions according to the characteristic of the Geneva lake water. The influence of pH, ionic strength and concentration of NOM was also investigated by considering the CeO<sub>2</sub> nanoparticle stability. Dynamic light scattering and electrophoretic measurement were used to study the surface charge and z-average hydrodynamic diameter of nanoparticles. Size distribution and visualization of nanoparticles were done by nanoparticle tracking analysis and scanning electron microscopy. We demonstrated the different aggregation behavior of CeO<sub>2</sub> nanoparticles in varied aquatic conditions. Our results suggest that nanoparticles can enter the environment in their

initial size and concentration of NOM plays an important role in modification of particle surface charge. The solution chemistry, i.e. presence of mono and divalent ions, as well as change of NOM concentration, lead to the aggregation, disaggregation or dispersion of nanoparticles in natural water.

## 8.2 Spéciation et dynamique des métaux dans les sols, interactions avec les microorganismes

the remediation of contaminated areas are also welcome.

### Speciation and dynamics of metals in soils, interaction with microorganisms

#### Responsables :

- Mélanie Davranche (Géosciences Rennes)  
melanie.davranche@univ-rennes1.fr
- Aline Dia (Géosciences Rennes)  
aline.dia@univ-rennes1.fr
- Laureline Février (IRSN, Cadarache)  
laureline.fevrier@irsn.fr
- Marie-Pierre Isaure (LCABIE-IPREM, Pau)  
marie-pierre.isaure@univ-pau.fr
- Béatrice Lauga (EEM-IPREM, Pau)  
beatrice.lauga@univ-pau.fr
- Jean Martins (LTHE, Grenoble)  
jean.martins@ujf-grenoble.fr
- Lorenzo Spadini (LTHE, Grenoble)  
lorenzo.spadini@ujf-grenoble.fr

#### Résumé :

La spéciation des éléments traces conditionne leur mobilité, leur biodisponibilité et leur toxicité dans l'environnement. Les microorganismes jouent également un rôle important sur cette spéciation. Cette session est dédiée à la spéciation et à la dynamique des éléments traces dans les sols au sens large (sédiments, sols contaminés, fond géochimique...) et considère leurs interactions avec les phases minérales, les substances organiques et les micro-organismes. Les études mettant en oeuvre des dispositifs expérimentaux divers (études sur sites, méso-cosmes, réacteurs en laboratoire, milieux extrêmes...), des échelles différentes (de la molécule au bassin versant), des techniques analytiques combinées (imagerie chimique, chimie des solutions, spectrométries de masse, spectroscopies...) ainsi que des approches de modélisation biogéochimique sont encouragées. Les contributions consacrées à l'étude de l'impact du rôle clé des microorganismes et des processus biogéochimiques mis en jeu dans la remédiation des milieux contaminés sont également bienvenues.

#### Abstract :

Speciation of trace elements affects their mobility, bioavailability and toxicity in the environment. Microorganisms also play an important role on this speciation. Not only does this session be focused on elucidating the speciation and dynamics of trace elements within soils in a broad sense (sediments, contaminated soils, geochemical background, etc.), but also considers their interactions with mineral phases, substances and microorganisms. Studies based on various experimental devices (such as field studies, mesocosms, laboratory reactors, extreme environments, etc.), at different scales (from the molecule to the watershed), combined analytical techniques (chemical imaging, solution chemistry, mass spectrometry, spectroscopy, etc.), and biogeochemical modelling approaches are encouraged. Contributions dedicated to the study of the impact of the key role of microorganisms and biogeochemical processes involved in

### 8.2.1 *Keynote communication* : Les zones humides source ou piège d'arsenic ?

Mélanie Davranche<sup>1</sup>, Aline Dia<sup>1</sup>, Béatrice Lauga<sup>2</sup>, Bernd Nowack<sup>3</sup>,  
 Mohammad Fakh<sup>1</sup>, Sébastien Martin<sup>1</sup>, Maya Al-Sid-Cheikh<sup>1</sup>,  
 Charlotte Catrouillet<sup>1</sup>, Hélène Guénet<sup>1</sup>, Mathieu Pedrot<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

<sup>2</sup>EEM-IPREM, Pau

<sup>3</sup>EMPA, ETH Zurich, Suisse

L'As est à l'origine d'un large éventail de problèmes de santé chez les êtres humains tels que des lésions de la peau et des cancers. La population exposée à des niveaux dangereux a augmenté depuis ces dernières décennies de plus de 100 millions. Les sources de contamination sont les eaux souterraines. L'As y est libéré par bioréduction d'oxydes de Fe porteurs d'As. Une autre hypothèse plus récente suggère que l'As est libéré via les zones humides. Des sédiments riches oxydes Fe (III) riches en As sont déposés lors des inondations puis réduits, libérant l'As qui est ensuite transporté dans les aquifères. Toutefois, la biogéochimie de l'As dans ces zones humides reste mal connue.

Nous nous sommes donc intéressés aux mécanismes de contrôle de la spéciation de l'As, dans les zones humides en période d'oxydation et de réduction. Une première cible a été l'étude des mécanismes de libération de l'As en période de réduction. Pour cela, nous avons développé un outil d'étude de l'évolution d'oxydes de Fe dopés en As directement dans un sol. Cet outil permet de quantifier et d'identifier les modifications morphologiques, chimiques et biologiques des oxydes de Fe. Les analyses génomiques ont montré une succession des communautés bactérienne impliquées dans la libération du Fe et de l'As. La matière organique (MO) est un acteur majeur. Elle sert à la fois de source de C aux microorganismes mais elle augmente aussi la solubilisation des oxydes et de l'As en maintenant le Fe(II) en solution.

Nous nous sommes ensuite intéressés au devenir cette solution réduite en période de reoxydation. Nous avons donc mis au point un système de récolte des sous-produits solides de la reoxydation. Ces solides sont très riches en As (>250 ppm). Des analyses NanoSIMS ont montré que l'As y est reparti avec le Fe. Des spots enrichis en As, en MO, en S mais appauvris en Fe apparaissent aussi et sont en cours d'études.

Ces travaux ont montré que les zones humides étaient capables de solubiliser fortement l'As en période de réduction et que cette solubilisation était augmentée par la présence de MO. Cependant, une grande partie de cet As est à nouveau piégé en période de reoxydation par précipitation de solides riches en Fe et en MO. Même si il est bien connu que l'As a une forte affinité pour les oxydes de Fe, la présence de spots riches en As et MO est nouvelle et reste à élucider.

### 8.2.2 (o) Les acides humiques peuvent-ils adsorber l'arsenic ?

Charlotte Catrouillet<sup>1</sup>, Mélanie Davranche<sup>1</sup>, Aline Dia<sup>1</sup>, Martine Bouhnik-Le Coz<sup>1</sup>, Gérard Gruau<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

L'empoisonnement à l'arsenic (As), via la contamination des eaux souterraines utilisées comme eaux de boisson est responsable de l'une des plus grandes mortalités et morbidités. En conditions oxydantes, l'As est majoritairement présent à l'état V et le fer (Fe) sous forme d'oxydes, connus pour adsorber l'As, alors qu'en conditions réduites l'As(III), plus toxique, est libéré. La matière organique (MO) est composée de groupements fonctionnels réactifs (phénoliques, carboxyliques, amines ou thiols), autorisant l'adsorption à sa surface de nombreux éléments chimiques. Si de nombreuses études de terrain et de laboratoire ont montré que l'As(III) et l'As(V) étaient capables de se complexer à la

MO, les mécanismes mis en jeu restent controversés. Une complexation de l'As via des ponts cationiques de Fe ou une complexation directe de l'As sur les groupements fonctionnels de la MO ont été envisagées. De récentes études EXAFS (Extended X-Ray Absorption Fine Structure) ont montré que l'As pouvait se complexer aux groupements thiols de la MO.

Dans cette étude, des expériences de batch ont été effectuées sur une gamme de pH de 2 à 9 pour étudier l'adsorption de l'As(III,V) sur deux acides humiques (AH) différents (Aldrich et Léonardite). La Léonardite a ensuite été enrichie en SH-, reproduisant des concentrations plus fortes en groupements thiols. Les résultats ont montré que de faibles quantités d'As(III,V) sont complexées aux AHs, mais que l'As(V) était plus fortement adsorbé que l'As(III). De plus, l'enrichissement en groupements thiols de la Léonardite augmente la quantité d'As(III,V) adsorbé. Ces données expérimentales ainsi que celles de la littérature seront utilisées pour déterminer les constantes de complexation entre l'As(III,V) et la MO via un modèle spécifique de la complexation des éléments par la MO (PHREEQC-Model VI). Ceci permettra de prédire les processus mis en jeu dans le milieu naturel, en conditions réduites ou oxydantes.

### 8.2.3 (o) Metal Speciation in Soil Solution : Comparison of Approaches Using SC-DMT, DGT and Model Predictions

Marc Benedetti<sup>1</sup>, Zongling Ren<sup>1</sup>, Mathieu Bravin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>Risque environnemental lié au recyclage, Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, Saint-Denis

Knowledge of the speciation of heavy metals in soil solution is a key to understanding their mobility and ecotoxicity, and the dissolved organic matter (DOM) is a dominant constituent involved in metal complexation. In this study, metal speciation of Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn in fourteen French soil solutions and four Chinese soil solutions at pH 4.4-7.6 was measured by soil column-Donnan membrane technique (SC-DMT), and DOM composition in these soil solutions was also determined. The results showed that in soil solution Pb and Cu were dominant in complex form, whereas Cd, Ni and Zn mainly existed as free ions; humic substances (HS) comprised 26.2% of DOM, and consisted mainly of fulvic acid (FA). The metal species measured by SC-DMT were compared to the predicted ones by Visual Minteq incorporating NICA-Donnan model using the measured FA concentrations and default parameters except for Pb. The free ion concentrations predicted by speciation modeling were in good agreement with the measurements. Diffusive gradients in thin-films gels (DGT) were also performed to quantify the labile metal species in the porewater of fourteen French soils. The concentrations of metal species detected by DGT were roughly compared with the free ion concentrations measured by DMT and the maximum dynamic concentrations calculated based on the predicted metal speciation in SC-DMT soil solutions. It was concluded that both inorganic species and FA bound species were DGT-labile, consistent with the dynamic features of this technique. The comparisons between measurements using analytical techniques and mechanistic model predictions provided mutual validation in their performance. Moreover, we found that to make accurate prediction of metal speciation in soil solutions, the knowledge of DOM composition was crucial, especially for Cu and Pb; and the specific binding parameters for Pb in NICA-Donnan model were required urgently to reduce the prediction uncertainties.

### 8.2.4 (o) Consequences of soil humic substances photoalteration on Cu(II), Cd(II) and Pb(II) behavior in aquatic media

Isabelle Worms<sup>1</sup>, Vera Slaveykova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Genève, Versoix, Suisse

Natural organic matter found in natural water systems is mainly composed of humic substances originated from soil. While reaching aquatic systems, environmental processes such as sunlight may affect their concentration and properties, which in turn is expected to modify their metal-binding capacity. Consequently, metal speciation, mobility and bioavailability to microorganisms should also be altered. By using a large array of analytical techniques, we explore here the effects of increase solar irradiance on chemical structures and molecular weight of a humic acid extracted from Elliott soil (EHA) and their consequences on Cd(II), Cu(II) and Pb(II) behavior. The results demonstrated that simulated sunlight induced an oxidation of EHA with an increase of -OH and -COOH group abundance, a formation of low molecular weight acids and a drop in EHA hydrodynamic size, indicating possible cleavage of intermolecular and/or covalent bounding. High radiance doses produced an increase of the free (unbound) metal concentrations, [M<sup>2+</sup>]. This phenomenon is accompanied by a narrowing of the size distribution of Cu(II)-EHA and Pb(II)-EHA complexes and a decrease of Cd bound to fluorescent components of lower size in the EHA assemblage. But, intracellular Cd, Cu and Pb contents of microalga *Chlamydomonas reinhardtii* followed the variations of [M<sup>2+</sup>].

### 8.2.5 (o) Modifications physico-chimiques des matières organiques dissoutes dans la rhizosphère des sols amendés avec des produits résiduels organiques : conséquences sur la spéciation de cuivre en solution

Tanalou Djac<sup>1,2,3</sup>, Cédric Garnier<sup>2</sup>, Matthieu Bravin<sup>1</sup>, Jean-Fabien Mayen<sup>1</sup>, Emmanuel Doelsch<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>UPR Recyclage et risque, Aix-en-Provence, Montpellier, Saint-Denis de la Réunion

<sup>2</sup>PROTEE, La Garde

<sup>3</sup>CEREGE, Aix en Provence

Dans le contexte de l'évaluation de l'impact des ETM dans les sols agricoles, la prédiction de la spéciation des ETM à partir de modèles géochimiques (ex. WHAM) nécessite de définir la réactivité de la MOD, le plus souvent considérée comme pouvant être équivalente à celle de substances humiques à un facteur près (% de réactivité). La plupart des études fixent cette valeur (40-80%), sans évidence expérimentale. Toutefois, des travaux récents ont démontré que la MOD des sols pouvait avoir une réactivité bien supérieure, nécessitant une caractérisation plus fine. Le but de cette étude est d'étudier les mécanismes entraînant une variabilité de la réactivité des MOD, en évaluant leurs modifications physico-chimiques dans le bulk-soil et la rhizosphère en contexte de recyclage agricole de produits résiduels organiques (PRO).

Lors d'une expérimentation in situ, 2 espèces végétales (fétuque et tomate) ont été cultivées avec 2 types de PRO (compost de lisier de porc et de fumier de volaille). Après la récolte, le sol adhérent aux racines (i.e. rhizosphère) ou non (i.e. bulk-soil) a été collecté. La solution du sol a été récupérée par extraction chimique. Par la suite, la concentration en COD, les propriétés de fluorescence/absorbance et d'acidité et les concentrations totale/ion libre en Cu ont été mesurées.

Le COD augmente avec l'apport des PRO dans le bulk-soil et surtout dans la rhizosphère. Les résultats de fluorescence/absorbance

confirment ces tendances et permettent d'identifier clairement la contribution des PRO dans les MOD de sols amendés. En termes de réactivité, la densité totale mais aussi le type de sites acides sont également significativement influencés par l'apport de PRO, et par les activités rhizosphériques. Ces résultats préliminaires, attestant de modifications qualitatives des MOD après l'application de PRO et l'influence des activités racinaires, démontrent la nécessité d'évaluer précisément la réactivité de la MOD des sols afin de correctement prédire la spéciation des ETM et leur phytodisponibilité.

### 8.2.6 (o) Influence de la matière organique et de l'activité bactérienne sur la mobilité de l'arsenic et des métaux dans des sols pollués

Hugues Thouin<sup>1,2</sup>, Tiffanie Lescure<sup>2</sup>, Pascale Gautret<sup>1</sup>, Catherine Jouliau<sup>2</sup>, Claude Lemilbeau<sup>1</sup>, Sebastien Dupraz<sup>2</sup>, Fabienne Battaglia-Brunet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

La restauration des propriétés physico-chimiques et des fonctions biologiques d'un sol contaminé par des polluants inorganiques nécessite le plus souvent des amendements de matière organique. Cependant, les interactions entre la matière organique et l'activité bactérienne des sols peuvent conduire à des réactions biogéochimiques influençant la mobilité des métaux. Quatre sols pollués, contenant d'importantes concentrations en As et en métaux, ont été échantillonnés sur des sites industriels et miniers. Ces sols ont été incubés en condition aérobie dans de l'eau, avec ou sans addition d'un mélange complexes de composés organiques. Des témoins abiotiques ont été préparés en autoclavant les sols. Les concentrations en As total, As (III), Fe, ainsi que Pb et Sb pour les deux sols présentant des concentrations importantes de ces éléments, ont été déterminées au début et à la fin de l'incubation. La biomasse et la diversité bactérienne ont également été évaluées en début et en fin d'expérience. Les résultats ont montré que, sans ajout de matière organique, les micro-organismes contribuent à diminuer les concentrations de métaux en solution. En revanche, l'ajout de matière organique dans les incubations biotiques augmente fortement la mobilité de l'As et du Pb. Dans ces conditions, seules les concentrations de Fe n'augmentent pas, suggérant que la mobilisation de l'As et du Pb n'est pas liée à la bioreduction des oxydes de fer mais à d'autres processus biogéochimiques. L'ajout de matière organique peut avoir plusieurs effets : (1) augmenter la solubilité des métaux par chélation avec des ligands organiques ; (2) influencer les métabolismes bactériens qui agissent sur la spéciation et la mobilité des métaux. Ces processus ont besoin d'être mieux compris afin de prédire la mobilisation d'éléments toxiques dans les sols pendant leur re-fonctionnalisation. Des expériences en grand volume, dans une colonne instrumentalisée, permettront de vérifier ces résultats et d'étudier le comportement d'un sol pollué dans un environnement contrôlé. Ce travail a été réalisé dans le cadre du Labex VOLTAIRE ANR,10,LABX,100,01.

### 8.2.7 (o) What are the geochemical and microbial influences on measured redox potential in soils : Modelling strategies and implications for contaminant mobility

Ekaterina Markelova<sup>1,2</sup>, Christopher T. Parsons<sup>2</sup>, Christina M. Smeaton<sup>1</sup>, Laurent Charlet<sup>1</sup>, Philippe Van Cappellen<sup>2</sup>, Raoul-Marie Couture<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université Joseph Fourier, Grenoble

<sup>2</sup>University of Waterloo, Ontario, Canada

A variety of locations such as flood plains, paddy fields and nuclear waste storage sites are subjected to temporally variable redox conditions, which result in a range of measured EH values. The EH exerts control on contaminant and nutrient speciation, as well as bulk chemistry and mineralogy, thereby affecting toxicity, bioavailability and mobility of contaminants in soil. Our objective is to elucidate the factors governing the response of the Pt-redox electrode in order to develop a predictive model of contaminant fate in redox oscillating environments. A series of increasing complexity experiments targeting a wide range of redox boundaries were conducted to evaluate the relative contributions of microbial and geochemical parameters to measured EH values. Specifically, a bioreactor system (Applikon Biotech.) was used to study the effects of the following factors : (1) oxygen saturation of the electrolyte solution ; (2) activities of inorganic (NO<sub>3</sub>-/NO<sub>2</sub>-/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) and organic (lactate/acetate) redox couples ; (3) microbial mediation (by *S. oneidensis* MR-1) of the electron transfer ; (4) presence of electron-accepting minerals (goethite).

Experimental results suggest that redox state of the electrolyte solution under well-aerated conditions can be modeled as the equilibrium between oxygen and a metastable hydrogen peroxide phase (Schuring et al., 1999) using Nernst equation. Also, a good fit of calculated to measured redox potential can be obtained for biotic geochemical systems under both oxic and anoxic conditions by using the modified Nernst equation specific to the stoichiometric relationship of each reaction (Chang et al., 2004). However, under microbial stress conditions, i.e. after depletion of the electron acceptor, measured redox potential was much lower than calculated one for the activities of major inorganic couples. We propose to account for a microbial activity when calculating redox potential of complex biogeochemical systems. By creating a dummy redox couple « BIO ox/red », that will represent numerous redox active organic compounds secreted by microorganisms into the bulk water (e.g. FMN/FMNH, NAD/NADH), theoretical redox potential may cover lower EH values and vary in a range from -167 mV to -403 mV.

References

Chang et al., 2004. Environ. Sci. Technol., 38(6)  
Schuring et al., 1999. Springer, 251

## 8.2.8 (o) Iron and arsenic speciation in marine sediments undergoing a re-suspension event. Impact of the biotic activity

Philippe Bataillard<sup>1</sup>, Sylvain Grangeon<sup>1</sup>, Paul Quinn<sup>2</sup>, Fred Mosselmans<sup>2</sup>, Abdeltif Lahfid<sup>1</sup>, Guillaume Wille<sup>1</sup>, Catherine Jouliau<sup>1</sup>, Fabienne Battaglia-Brunet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>Diamond Light Source, Harwell Science and Innovation Campus, Oxfordshire, Royaume-Uni

The change of chemical conditions of sediment following a re-suspension event might lead to release of sequestered pollutants. In the present study, As and Fe speciation were investigated before and after such event, in a contaminated sediment from L'Estaque marina (France). Cores (0-60 cm) and surface sediment (0-10 cm) were collected by a diver. Sediment properties along the core were determined by coupling chemical extractions, diffraction (XRD) and spectroscopic techniques (*mu*-XRF, SEM-EDS, Raman spectroscopy and XANES). Laboratory experiments mimicking re-suspension and resettlement events were conducted over a period of three months in both biotic and abiotic (autoclaved) conditions. In both cases, oxidation proceeded by oxygen diffusion from the top to the bottom of the sediment.

Results show that the unperturbed sediment is anoxic. Arsenic (between 194 and 473 *μg* g<sup>-1</sup>), almost fully under its trivalent As(III) form, is mainly carried by the iron-monosulfide mackinawite. The observed progressive pyritisation of mackinawite with depth is not accompanied by

further reduction of As which means that As remains bounded to mackinawite, as incorporation into the pyrite lattice would require that it reduces to its (-I) oxidation state.

After oxidation during the re-suspension event, and in abiotic conditions, arsenic ended up to be fully pentavalent As(V) in the oxidized zone of the re-settled sediment. On the contrary, in the biotic experiment, the development of a bacterial mat, which certainly consumed oxygen for respiration processes, preserved the sediment from total oxidation. Consequently, As was present both under As(III) and As(V) forms. The diversity of *aioA* genes was large, and similar in the oxidized layer and the deeper black-colored sediment.

These results indicate that biological processes partly control the in-situ geochemical system by inducing low redox areas in theoretically oxidized sediments.

## 8.2.9 (o) Evaluation de l'écotoxicité des métaux lourds dans les sols à micro-échelle par une approche couplée de géochimie et de génomique environnementale

Frédéric Lehembre<sup>1</sup>, Aline Navel<sup>1</sup>, Erwann Vince<sup>1</sup>, Sophie Sebastianutti<sup>1</sup>, Lorenzo Spadini<sup>1</sup>, Jean Martins<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LTHE, Grenoble

Les pollutions d'origine industrielle ou agricole ont engendré une forte augmentation de la teneur en métaux dans les sols. Leur présence en quantité élevée a des effets délétères sur l'abondance, l'activité et la diversité des microorganismes. A long terme, ces effets toxiques perturbent et modifient les équilibres compétitifs entre espèces et entraînent en retour une altération des cycles biogéochimiques et donc une diminution de la fertilité des sols. Les métaux, comme les microorganismes, se répartissent de façon non aléatoire dans les sols. Leur localisation dépend de nombreux facteurs environnementaux comme par exemple le taux d'argile, de matière organique ou encore la structure du réseau poral. Tous ces facteurs vont influencer la spéciation et la circulation des métaux au sein des différents agrégats du sol, modulant ainsi leur accessibilité aux microorganismes. Cependant, rares sont les études qui prennent en compte l'impact des métaux lourds sur l'ensemble de la diversité microbienne des sols présente à micro-échelle. Nous avons donc développé une approche originale de micro-biogéographie combinant les outils classiques de géochimie aux nouveaux outils de génomique environnementale tels que le séquençage à haut débit de l'ADN et la PCR en temps réel. Ce travail nous a permis de caractériser le rôle de la structure spatiale des sols dans le contrôle de l'impact de 3 métaux lourds modèles seuls ou en mélange sur l'ensemble des communautés microbiennes colonisant les différents micro-compartiments d'un sol agrégé.

## 8.2.10 (o) Interactions between uranium and *Microbacterium* sp. A9, a strain isolated from the Chernobyl exclusion zone, evidenced by microscopic and spectroscopic techniques

Nicolas Theodorakopoulos<sup>1,2</sup>, Virginie Chapon<sup>2</sup>, Frédéric Coppin<sup>1</sup>, Magali Floriani<sup>3</sup>, Thomas Vercoouter<sup>4</sup>, Claire Sergeant<sup>5</sup>, Virginie Camilleri<sup>3</sup>, Catherine Berthomieu<sup>2</sup>, Laureline Fevrier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Biogéochimie, Biodisponibilité et Transfert des radionucléides, IRSN, Saint Paul-lez-Durance

<sup>2</sup>Laboratoire des Interactions Protéine-Métal, CEA, CNRS, Saint-Paul-lez-Durance

<sup>3</sup>Laboratoire d'Ecotoxicologie des radionucléides, IRSN, Saint Paul-lez-Durance

<sup>4</sup>Laboratoire de développement Analytique, Nucléaire Isotopique et Élémentaire, CEA, Gif-Sur-Yvette

<sup>5</sup>Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan

Although uranium (U) is naturally found in the environment, soil remediation programs will become increasingly important in light of certain human activities. This work aimed to identify U(VI) detoxification mechanisms employed by a bacteria strain isolated from a Chernobyl soil sample, and to distinguish its active from passive mechanisms of interaction. The ability of the *Microbacterium* sp. A9 strain to remove U(VI) from aqueous solutions at 4°C and 25°C was evaluated, as well as its survival capacity upon U(VI) exposure. The subcellular localisation of U was determined by TEM/EDX microscopy, while functional groups involved in the interaction with U were further evaluated by FTIR; finally, the speciation of U was analysed by TRLFS. Our data reveal that *Microbacterium* sp. A9 exhibits a high capacity of survival and resistance to U(VI) under aerobic conditions. This bacterium accumulates U(VI) and is capable of developing various detoxification mechanisms. Three such mechanisms have been identified, all of which involve phosphate. The first one mediates phosphate release in the exposure media, which may complex with uranium to prevent its further entrance into the cells. The second one mediates the efflux of U from the bacteria and the third one is involved in precipitating intracellularly-accumulated uranium as autunite. These findings support the potential role of the genus *Microbacterium* in the remediation of aqueous environments contaminated with U(VI) under aerobic conditions.

### 8.2.11 (o) Mobilité du plomb et diversité microbienne dans des sols industriels fortement contaminés

Arnaud Schneider<sup>1</sup>, Maxime Gommeaux<sup>1</sup>, Marie Ponthieu<sup>1</sup>, Benjamin Cancès<sup>1</sup>, Xavier Morvan<sup>1</sup>, Jérôme Duclercq<sup>2</sup>, Jérôme Lacoux<sup>2</sup>, David Roger<sup>2</sup>, Elise Philippe<sup>2</sup>, Béatrice Marin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Groupe d'Étude sur les Géomatériaux et Environnements Naturels, Anthropiques et Archéologiques, Reims

<sup>2</sup>Ecologie et Dynamique des Systèmes Anthropisés, Amiens

La mobilité des éléments-traces métalliques (ETM) est conditionnée par leur distribution entre la phase solide et la solution du sol ainsi que par leur répartition entre les différentes phases organiques et minérales du sol. Le taux de contamination, la nature du couvert végétal et l'activité des communautés microbiennes influencent la réactivité de ces phases organiques et minérales vis-à-vis des ETM et donc la mobilité de ces derniers. Le but de cette étude est d'évaluer l'influence de la contamination en Pb sur la diversité microbienne et/ou l'influence de l'activité microbienne sur la mobilité de Pb et donc sur les risques de contamination des eaux superficielles et souterraines.

Les sols étudiés sont situés à proximité d'une industrie de recyclage de batteries au plomb, succédant à une activité de seconde fusion du fer. Le site est environné de sols forestiers (conifères et feuillus) et traversé par un cours d'eau.

Une cartographie par fluorescence X des teneurs en Pb dans les sols de surface avoisinant l'usine a conduit à la sélection de 6 points d'intérêt en fonction du degré de contamination (500 mg.kg<sup>-1</sup> < [Pb] < 9000 mg.kg<sup>-1</sup>) et de la nature du couvert végétal. Après prélèvement et caractérisation physico-chimique de ces 6 sols sur une profondeur de 80 cm, la détermination des teneurs en Pb dans la solution du sol, ainsi que la répartition de Pb entre phase solide et solution du sol, a permis de mettre en évidence une mobilité de Pb différente selon les profils.

Enfin, la diversité des communautés microbiennes a été déterminée dans les sols de surface grâce au séquençage des gènes codant l'ARNr 16S et 18S ainsi que de gènes impliqués dans le métabolisme des ETM.

Ces résultats seront mis en relation avec les caractéristiques physico-chimiques du sol et de sa solution afin d'appréhender les risques de remobilisation de Pb et les impacts environnementaux potentiels.

### 8.2.12 (o) Investigation of short-and long term selenium fate in forest soil

Pamela Di Tullio<sup>1,2</sup>, Maité Bueno<sup>1</sup>, Yves Thiry<sup>2</sup>, Isabelle Le Hecho<sup>1</sup>, Florence Pannier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LCABIE-IPREM, Pau

<sup>2</sup>ANDRA, Chatenay Malabry

Selenium biogeochemistry in soils is of worldwide environmental concern notably due to its spatial variability and the extremely narrow range between deficiency and toxicity. In that context, the purpose of our study was to investigate Se mobility in a forest soil (as a model), in both short and long term in order to improve our capacity to predict its behavior which is mandatory to consolidate ecological and radiological risk assessment models.

To achieve this goal the objectives were, (1) to evaluate Se distribution at different soil depths by parallel single extractions targeting different operationally defined Se-bearing fractions and, (2) to compare distribution/speciation of ambient Se with that of added Se over a 2-years field experiment by using soil-test enriched in isotopic tracers (Se(IV)).

Results obtained from selective extractions made at different depths of the soil column confirmed that organic matter may greatly influence Se retention by acting as a selective sorbent for Se and by promoting the formation of organo-mineral associations, with a high affinity for Se. The results of selective extractions at the beginning (T0) and at the end of incubation period under real environmental conditions were helpful to decipher the dynamics of Se speciation in soil. At T0 the added Se was recovered in the exchangeable and organic soil fractions essentially in the form of Se(IV). With time, the distribution of added Se was gradually modified, with total Se recoveries in operationally well-defined soil fractions decreasing along with the proportion of Se(IV). After 2-years of in situ incubation, added and ambient Se still showed different behavior in terms of speciation and distribution between soil solid phases indicative of higher lability of added Se and evidencing slow processes controlling Se transformation and retention in soils.

### 8.2.13 (o) Phytostabilisation of a highly contaminated mine tailing : Impact of the symbiotic association *Anthyllis vulneraria* - *Mezorhizobium metallidurans* on Cd speciation in soils

Stéphanie Huguet<sup>1</sup>, Souhir Soussou<sup>2</sup>, Jean-Claude Cleyet-Mare<sup>2</sup>, Angela Trapananti<sup>3</sup>, Nicolas Trcera<sup>4</sup>, Marie-Pierre Isaure<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LCABIE-IPREM, Pau

<sup>2</sup>Laboratoire des symbioses tropicales et méditerranéennes, Montpellier

<sup>3</sup>European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble

<sup>4</sup>Synchrotron SOLEIL, Gif-sur-Yvette

The legume plant *Anthyllis vulneraria* and its symbiotic association with *Mezorhizobium metallidurans* occur naturally on mine tailings from South of France (Les Avinières, 1382 ppm Cd, 161 000 ppm Zn [1]) and has been found to be pioneer for revegetation process involved in phytostabilisation. The aim of this study, based on an experimental site, is to determine the bioavailability, distribution and speciation of Cd in a bare soil (with no plant) and in *Anthyllis* rhizosphere - including the

rhizobium nodules - developed on the mining site for 10 years. We intend to evaluate the effect of *A. vulneraria* on Cd behaviour in the soil, and thus its efficiency in metal stabilization.

X-ray absorption spectroscopy is a synchrotron based technique that has demonstrated great potential for the study of ligands binding Cd in biological samples [2, 3]. In this work, Cd K-edge EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure) was applied to probe Cd chemical environment in bulk and different granulometric and densimetric fractions of soils with or without plant. Combination of  $\mu$ XRF (micro X-ray Fluorescence) and Cd LIII-edge  $\mu$ XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure) was used to determine elemental distributions in soils and rhizobium nodules. EDTA and H<sub>2</sub>O extractions were performed for assessment of Cd bioavailability.

There was no significant effect of the plant on the Cd exchangeable fraction (i.e. Cd extracted by H<sub>2</sub>O), but a slight increase of Cd extracted by EDTA was observed. Spectroscopy results showed that Cd mainly occurred as CdCO<sub>3</sub> in both bulk samples; there was no a real impact of Anthyllis on bulk Cd speciation in soils after 10 years of phytostabilization. A slight difference of Cd speciation in rhizospheric and bare soils depending on particles size was highlighted: the plants could slightly change Cd speciation in the light fraction. In nodules, Cd was mainly bound to S ligands and found in cells infected by N-fixing bacteria.

[1] Frérot et al., 2006. Plant and Soil 282, 53-65

[2] Isaure et al., 2006. Spectrochimica Acta Part B Atomic Spectroscopy 61, 1242-1252

[3] Fukuda et al., 2008. Journal of Analytical Atomic Spectrometry 23, 1068-1075

### 8.2.14 (o) Dynamics of Zn in a Soil-plant System : Combined Isotopic and Spectroscopic Approach

Géraldine Sarret<sup>1</sup>, Anne-Marie Aucour<sup>2</sup>, Jean-Philippe Bedell<sup>3</sup>,  
Marine Queyron<sup>3</sup>, Sarah Bureau<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>LGLTPE, Lyon

<sup>3</sup>LEHNA, Lyon

Plants play a key role for the stabilization of metals in contaminated environments. Although there is some knowledge on Zn uptake and storage mechanisms for hyperaccumulating plants (Verbruggen et al., 2009), other plant species have been little studied. Other studies have focused on the soil compartment and showed a key role of the rhizospheric activity on Zn stabilization in contaminated media (Panfili et al., 2005). This study aimed at studying the dynamics of Zn in the soil-plant system by combining chemical extractions, EXAFS spectroscopy, micro X-ray fluorescence, and stable Zn isotopes measurements on the various plant organs, dead biomass and soil compartments.

The plant chosen is *Phalaris arundinacea* (reed canary grass), an aquatic plant ubiquitous in natural wetlands of Europe, and candidate energy crop species for constructed wetlands. The site studied is an infiltration basin receiving urban rainwater, in which *Ph. arundinacea* developed spontaneously. The water inlet, soil, soil after chemical extractions and soil size fractions, living plant organs, dead biomass and litter were studied.

Zn speciation drastically changed from the water inlet to the soil, and we were able to relate Zn fractionation rates with the nature of Zn phases formed. For the plant, isotopic ratios decreased from the roots to the aerial parts, whereas Zn speciation was identical in the various organs. This is consistent with a fractionation resulting from Zn transmembrane transporters, not from the final Zn sequestration forms. Intense Zn exchanges were observed for the dead biomass, with the sorption of heavy isotopes from the soil on cell wall remains, and possibly release of light isotopes. Overall, this study provides a complete overview of Zn cycling

in a soil-plant system, and relates some changes in Zn speciation with Zn isotopic fractionation processes in a complex system.

References

Panfili, F, et al. (2005) The effect of phytostabilization on Zn speciation in a dredged contaminated sediment using scanning electron microscopy, X-ray fluorescence, EXAFS spectroscopy and principal components analysis. *Geochim. Cosmochim. Acta* 69, 2265-2284.

Verbruggen, N., et al. (2009) Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. *New Phytol.* 181, 759-776.

### 8.2.15 (o) An Isotopic Exchange Kinetics Model to describe the role of Ni bearing phases on its mobility

Isabella Zelano<sup>1,2</sup>, Yann Sivry<sup>1</sup>, Cécile Quantin<sup>3</sup>, Alexandre Gelabert<sup>1</sup>, Mickael Tharaud<sup>1</sup>, Adeline Maury<sup>1</sup>, Sophie Nowak<sup>4</sup>,  
Karine Phalyvong<sup>1</sup>, Merri Malandrino<sup>2</sup>, Marc Benedetti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>Univeristà degli Studi di Torino, Italie

<sup>3</sup>Université Paris Sud, Orsay

<sup>4</sup>Interfaces, Traitements, Organisation et Dynamique des Systèmes, Paris

Although ultramafic rocks constitute about only 1% of the terrestrial landscape, their chemical weathering has been extensively studied over the last three decades because the great nickel-ore deposits show an important level of metal bioavailability and metal solid speciation has been clearly detailed. Depending on the parent material and chemical weathering processes, the main mineral phases deriving from ultramafic rocks in tropical climate are Mg rich phyllosilicates (serpentine, talc, chlorite) and smectite (saponite, nontronite and montmorillonite) or Fe-rich products, like goethite and hematite. The overarching goal of the present study was to quantitatively decipher the role of each bearing phase on nickel isotopic exchange kinetics (IEK) in ultramafic soils in a tropical context. Six mineral phases known to be Ni scavenger in such environment were selected (goethite, hematite, deweylite, chrysotile, smectite, chlorite) and IEK experiments have been performed using <sup>61</sup>Ni during 14 days. Isotopic ratios were determined by High-Resolution ICP-MS and Evalues calculated for each time step. Experimental data were then fitted and modeled with a pseudo-first-order equation. The fit-model allowed to quantify kinetic reaction constants, k, discriminating between different type of sorption/interaction sites. This approach allows to establish and model, for the first time, the link between exchange kinetic pools of Ni and its bearing phases.

### 8.2.16 (o) Ecodynamics of Potential Toxic Elements in technosols from former mining and smelting areas

Bashar Qasim<sup>1</sup>, Mikael Motelica-Heino<sup>1</sup>, Emmanuel Joussein<sup>2</sup>,  
Marilyne Soubrand<sup>2</sup>, Arnaud Gauthier<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>Université de Limoges, Groupement de Recherche Eau, Sol, Environnement, Limoges

<sup>3</sup>Université Lille 1, Sciences et technologies

Our study aimed at reporting the chemical speciation, (phyto)availability and potential remobilization of several potentially toxic elements (PTE) in contaminated technosols of two former smelting and mining areas. Soil samples were taken from a metallophyte grassland contaminated with Zn, Pb and Cd located at Mortagne - du - Nord (MDN) (North France) and from a former mining settling basin contaminated with As, Pb and Sb located at la Petite Faye (LFP) (Limoges, France). Two sequential extraction schemes were used to

evaluate the PTE speciation in various technosols as operationally defined fractions. To assess the metals and metalloids (phyto)availability, a series of selective single extraction procedures was conducted while soil pore waters (SPW) were extracted by Rhizons samplers and both Chelex-100 and ferrihydrite-backed DGT (diffusive gradients in thin films) were deployed in the soils to assess the potential remobilization of PTE together with short-term germination tests with dwarf beans. Our results indicates that Zn, Cd and Pb were mainly associated with the acid soluble and reducible fractions for the MDN site, while As, Sb and Pb were mostly associated with residual fraction for the LPF site. The extraction capacity of the PTE followed the order : EDTA>DTPA>NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>>CaCl<sub>2</sub>> NaNO<sub>3</sub> for both studied locations. The concentrations of PTE accumulated in the bean primary leaves and their extractable concentrations showed a positive significant correlation with dilute CaCl<sub>2</sub> and unbuffered nitrate solutions extraction procedures. In contrast, for all studied elements, except for Pb, the complexing and chelating extractants (e.g. EDTA and DTPA) exhibited poor correlation with the dwarf bean leaves concentrations. The amounts of PTE extracted with DGT devices were correlated well with total dissolved PTE concentrations in the SPW and concentrations in the dwarf bean primary leaves.

### 8.2.17 (o) Dispersion et risques potentiels écologiques et environnementaux de Cd, Pb et Zn au sein d'un oued contaminé par des déchets miniers en contexte semi-aride et carbonaté

Grégoire Pascaud<sup>1</sup>, Salma Boussen<sup>2</sup>, Marilyne Soubrand<sup>1</sup>, Emmanuel Joussein<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Limoges, Groupement de Recherche Eau, Sol, Environnement, Limoges

<sup>2</sup>Faculté des Sciences de Tunis, laboratoire des Ressources Minérales et Environnement, Tunis, Tunisie

Les zones fortement contaminées par des éléments métalliques et métalloïdes représentent un risque non négligeable pour la biosphère et particulièrement dans les zones semi-arides. Le risque qui en résulte dépendant de la nature des contaminants, de leurs mobilités potentielles ainsi que de la nature des organismes récepteurs, impose la caractérisation préalable des phases porteuses et forcément l'étude de leur devenir au sein du bassin versant.

Cette étude porte sur l'impact d'une ancienne mine de plomb/zinc en amont d'un bassin versant drainant les eaux contaminées vers des zones agricoles et habitées. Les tailings (200 millions de tonnes) sont drainés par un oued qui serpente à travers les parcelles agricoles du Nord de la Tunisie et se jette dans la zone humide d'Ichkeul classée au patrimoine mondial de l'UNESCO. Le but consiste à déterminer les processus conduisant à la dissémination des contaminants le long du cours d'eau dans une zone semi-aride et en contexte carbonaté et finalement d'en évaluer (i) les risques environnementaux et (ii) les risques potentiels écologiques. Pour cela, 2 campagnes de prélèvements ont été entreprises afin de caractériser géochimiquement et minéralogiquement la fraction particulière (sédiments et matières en suspension) et la fraction dissoute. Les études géochimiques des déchets miniers montrent des teneurs élevées en métaux (40000 mg.kg<sup>-1</sup> de Pb, 6000 mg.kg<sup>-1</sup> de Zn et 50 mg.kg<sup>-1</sup> de Cd). Comme attendu, les sédiments présentent un enrichissement en métaux qui s'atténue vers l'aval. L'étude géochimique et minéralogique des matières en suspensions ont mis en évidence la mobilisation des rejets et leurs re-déposition dans le lit de l'oued. De plus, il apparaît une différence nette de comportement entre les éléments chimiques qui est reliée à différente spéciation solide des métaux à l'échelle

du bassin versant. Enfin, les risques associés à ce type de pollution seront discutés suite aux calculs des risques écologiques potentiels et des indices d'évaluation du risque.

### 8.2.18 (p) How do low doses of DFOB and EDTA affect the phytoextraction of trace elements by *Helianthus annuus* ?

Jean-Yves Cornu<sup>1,2</sup>, Clément Dépernet<sup>1,2</sup>, Armelle Braud<sup>3</sup>, Thierry Lebeau<sup>3</sup>

<sup>1</sup>INRA, ISPA, Villenave d'Ornon

<sup>2</sup>INRA, ISPA, Gradignan

<sup>3</sup>LPG, Nantes

Phytoextraction is the only way for the in situ cleaning-up of metal-contaminated soils. The main weakness of phytoextraction is the long cleaning-up duration primarily caused by the low phytoavailability of metals in soil. Inoculation of siderophore-producing bacteria (SPB) has been proposed as a strategy to optimize metal phytoextraction. The present study focuses on desferrioxamine B (DFOB), the main siderophore produced by the actinobacteria *Streptomyces pilosus*. DFOB is characterized by a high selectivity for Fe(III) but also by a good affinity for divalent metals including Cd, Cu, Ni, Pb and Zn. The purpose of this work was to compare the efficiency of a low dose of DFOB vs. EDTA on the phytoextraction of trace elements by sunflower. The main goal was to dissect the impact both chelators have on the metals mobilisation from the solid phase, their speciation in soil solution, their uptake by plant roots and their translocation from roots to shoots.

Two cultivars of sunflower with contrasted pattern of metal repartition were grown for 28 days on a calcareous soil contaminated in Cu, Cd, Pb and Zn. Four days after transplanting, DFOB or EDTA were supplied at the concentration of 200 μmol kg<sup>-1</sup> soil. Soil solution was extracted every week using soil moisture samplers. At harvest, xylem sap was collected on every plant by the « root pressure » method. Plants were divided into roots and shoots and plant tissues were dried, milled and digested in a mix HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. The concentrations of metals in soil solution, xylem sap and plant tissues were assayed by ICP-MS. Investigations are in progress to quantify in soil solution the concentrations of DFOB and EDTA using the Fe-CAS method, and the labile fraction of metals by anodic stripping voltammetry.

The results will provide new insights on the mechanisms by which DFOB alters the soil-plant transfer of metals and, thus, on the efficiency of coupling phytoextraction with the inoculation of siderophore-producing-bacteria.

### 8.2.19 (p) Influence of synthesis conditions and bacterial biomass on biogenic birnessite structure and reactivity

Naomi Dumas<sup>1</sup>, Jasquelin Peña<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de géochimie environnementale, Institut des dynamiques de la surfaces terrestre, Faculté des géosciences et de l'environnement, Université de Lausanne, Suisse

Birnessite minerals (layer-type MnOx) participate in important biogeochemical processes particularly trace metal sorption. Birnessite particles produced by bacteria are embedded in a biofilm matrix. The impact of the biofilm on the birnessite structure and reactivity is poorly understood. Based on previous studies, the partitioning of metals to the birnessite or biomass components of the biomass-birnessite assemblage appears to vary as a function of synthesis conditions. Based on these observations, we hypothesize that changing the concentration of Mn(II)

supplied to the bacteria during growth and the rate of enzymatic Mn(II) oxidation modifies the mineral structure and sorption capacity.

In our study we investigated the impact of bacterial growth conditions on the sorption reactivity of biogenic birnessite. We produced various sorbents using *Pseudomonas putida* GB-1 cultures incubated with varying : Mn concentrations (0.05 - 1.0 mM) and carbon concentrations (0.55 or 5.5 mM glucose). After sorbent characterization by potentiometric titration and chemical analysis by ICP-OES to determine the average manganese oxidation number (AMON) and the Mn oxidation rates, respectively, we carried out Ni sorption experiments at pH 6. Sorption experiments were complemented with Ni K-edge extended X-ray absorption fine structure (EXAFS) measurements. Our results show that the proportion of vacancy sites on biogenic birnessite that bind Ni in inner-sphere surface complexes decreases as the Mn concentration in the medium increases. However, the sorption capacity of the biomass remains relatively constant for a given carbon concentration in the growth medium. Finally, independent of the quantity of biomass in the adsorbent, Ni partitions preferentially to the mineral phase, adsorbing as triple-corner-sharing complexes at the vacancy sites.

### 8.2.20 (p) Bacterial response to changing biogeochemical conditions causes dissolution of biogenic manganese oxide minerals

Julia Gonzalez-Holguera<sup>1</sup>, Jasquelin Peña<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Lausanne, Suisse

Birnessite minerals (layer type MnO<sub>2</sub>) play major roles in soils and aquatic ecosystems both by displaying remarkably high capacities for trace metal sorption and by being among the strongest oxidants available. The main recognized pathway for birnessite production in these environments is microbial enzymatic oxidation of Mn(II) to form MnO<sub>2</sub>. The resulting MnO<sub>2</sub> mineral phase is embedded in a biofilm matrix. The reactivity and stability of birnessite particles is therefore not merely determined by its intrinsic physico-chemical properties, but is instead coupled tightly to the metabolic activity of nearby cells and to the chemical characteristics of the exopolymeric substances (EPS).

In this study, we investigate how changing biogeochemical conditions impact the stability of the biogenic MnO<sub>2</sub> produced by the model Mn(II)-oxidizing bacteria *Pseudomonas putida* GB-1 (*P. putida*). Variations in the carbon source and concentration provided to the bacteria have a direct effect on MnO<sub>2</sub> precipitation and long-term stability. We have observed that punctual input of fresh glucose to a bacterial-MnO<sub>2</sub> assemblage undermines the stability of the mineral. Also, the addition of redox active metals, in particular Fe and Cu, to these bacterial-mineral suspensions leads to extensive reductive dissolution of the mineral, with up to 80% of the initial 1mM Mn in solid phase accumulating in solution as Mn(II) over a 24h timescale. Failure to re-create the system with synthetic  $\delta$ -MnO<sub>2</sub>, a characteristic bell-shaped concentration dependence of mineral dissolution on metal concentration and inhibition of dissolution following heating pre-treatment (70°C) strongly suggest these reductive dissolutions to be related to microbial metabolism. Further studies will aim to determine whether the dissolution of MnO<sub>2</sub> is driven by primary or secondary bacterial metabolism. This work shows how microbial metabolic response to varying environmental conditions continuously redefines the fate of biogenic minerals.

### 8.2.21 (p) Modeling of rare earth element sorption to *Bacillus subtilis* surface

Olivier Pourret<sup>1</sup>, Raul Martinez<sup>2</sup>, Yoshio Takahashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais

<sup>2</sup>Institut für Geo- und Umweltwissenschaften, Albert-Ludwigs Universität, Freiburg, Allemagne

<sup>3</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, Hiroshima, Japon

Rare earth element (REE) binding constants and site concentration on the Gram positive bacteria surfaces were quantified using a multi-site Langmuir isotherm model, along with a linear programming regression method (LPM), applied to fit experimental REE sorption data. One discrete REE binding site on the *Bacillus subtilis* surface was found for the pH range of 2.5 to 4.5. Average log<sub>10</sub> REE binding constants for a site *j* on these bacteria ranged from  $1.08 \pm 0.04$  to  $1.40 \pm 0.04$  for the light REE (LREE : La to Eu), and from  $1.36 \pm 0.03$  to  $2.18 \pm 0.14$  for the heavy REE (HREE : Gd to Lu) at the highest biomass concentration of 1.3 g/L of *Bacillus subtilis* bacteria. Similar values were obtained for bacteria concentrations of 0.39 and 0.67 g/L indicating the independence of REE sorption constants on biomass concentration. Within the experimental pH range in this study, *Bacillus subtilis* was shown to have a lower affinity for LREE a higher affinity for HREE suggesting an enrichment of HREE on the surface of Gram positive bacteria. Total surface binding site concentrations of  $6.73 \pm 0.06$  to  $5.67 \pm 0.06$  and  $5.53 \pm 0.07$  to  $4.54 \pm 0.03$  moles/g of bacteria were observed for LREE and HREE respectively. The difference in these values suggests a distinction between the LREE and HREE binding modes to the bacteria reactive surface at low pH. This further implies that HREE may bind more than one monoprotic reactive group on the cell surface. A multisite Langmuir isotherm approach along with the LPM regression method, not requiring prior knowledge of the number or concentration of cell surface REE complexation sites, were able to distinguish between the sorption constant and binding site concentration patterns of LREE and HREE on the *Bacillus subtilis* surface. This approach quantified the enrichment of Tm, Yb and Lu on the bacteria surface and it has therefore proven to be a useful tool for the study of natural reactive sorbent materials controlling REE partitioning in the natural environment.

### 8.2.22 (p) Multivariate factorial kriging to delineate multi-scale spatial variation of rare earth elements in stream waters in France

Claudia Cherubini<sup>1</sup>, Romain Armand<sup>1</sup>, Olivier Pourret<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hydrise, Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais

This study is based on FOREGS (Forum of European Geological Surveys) Geochemical data that consists in a sampling at regular mesh on all Europe. In France, 119 stream water samples were extracted in drainage basins.

On the basis of their atomic number and of the results of a preliminary Principal Component Analysis three REE have been selected (La, Eu and Lu), and five physicochemical properties (pH, organic carbon, carbonates, Fe and Mn).

A cokriging has been applied that shows a similar spatial organization of REE : higher values are observed in the Aquitaine basin, more locally in the Alpine valley corridors of the Rhone, and along some effluents of the Loire and the Seine.

In order to investigate more deeply on the different sources of variation acting in the study area, a factorial cokriging is applied. The first two regionalized factors have been estimated that, at the cost of an acceptable loss of information, synthesize the conjoint variability of the elements and give a synthetic description of the process in study at the different selected spatial scales. The coregionalisation analysis shows a short range structure with a range of 120 km that explains only the 70% of the spatial variability and a long range structure with a range of 250 km that explains up to 97% of the spatial variability and that appears to be representative of most of the conjoint variability of the elements in

study.

At high spatial scales environmental parameters like Fe, carbonates, pH, that might be ascribed to the rock's nature or to other geological larger scale processes, such as hydrographic network and topography have shown to affect REE distribution.

At short range, only Eu and Mn weight more, this might be ascribed to the process of liberation of manganese oxides in rivers that also releases the REE sorbed on these oxides. The short range variability cannot be explained satisfactorily (70%) by the adopted sampling as the sampling scale is too wide and can give sufficient information for a correlation scale of hundreds of km. To be able to infer the variation at a smaller scale, further sampling on a finer spatial scale would be needed.

### 8.2.23 (p) Origin of As spatial heterogeneity in organic-rich by-products of riparian wetland soil

Hélène Guénet<sup>1</sup>, Maya Al-Sid-Cheikh<sup>1</sup>, Mélanie Davranche<sup>1</sup>,  
 Delphine Vantelon<sup>2</sup>, Jacques Jestin<sup>3</sup>, Martine Le Coz-Bouhnik<sup>1</sup>,  
 Patrice Petitjean<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Rennes

<sup>2</sup>Soleil Synchrotron, Gif-sur-Yvette

<sup>3</sup>Laboratoire Léon Brillouin, Gif-sur-Yvette

Extensive arsenic poisoning in drinking water has been reported in Asia, Argentina, Chile and Mexico. The contamination can derive from reduction processes occurring at soil near-surface and especially in riparian wetlands. The major characteristic of these areas is that flooding induces alternating oxidizing and reducing conditions in accordance with the water saturation. It has been shown that under reduced conditions, As and Fe solubilization is increased by the presence of colloidal organic matter (OM) in soil solution. But what happens to As when the water level decreases and subsequent soil oxidation is established ?

Samples consisting of reoxidation products (Fe-OM rich) of a riparian soil solution are collected on PTFE plates inserted into the upper horizons of the soil during the dry season. Geochemical analyzes showed 75% of OM, 9% of Fe and 250 mg.g<sup>-1</sup> of As. First SEM and NanoSIMS results indicate that As is not only associated with Fe-oxides as expected in oxidized conditions, but also with OM and S-rich particles. Studies demonstrated that, in peat, As (III) is as sulphide minerals or directly bound to OM via sulfhydryl sites. However, in the oxidized precipitates, it is unlikely that As being as sulphide minerals and the sole OM-SH complexes cannot explain such concentration. Thereby, the presence of As-rich OM(S) is still unsolved.

XAS (XANES and EXAFS) spectroscopy has been used to determine the local environment of sulfur since it appeared to be a key factor in the binding of As to OM. XAS was performed at the sulfur K-edge (Lucia beamline, Soleil synchrotron, Saclay) on our natural samples and several model compounds. Using XANES, sulfur could be seen in several oxidation degrees (from -II to +VI). EXAFS spectra will then provide information on the As-S, S-O, and perhaps on S-C bonding and will highlight the relation between As and OM. Thereby those results will show the ability of OM to directly or not bind As under oxidizing conditions and therefore whether wetlands are sinks or sources to As.

### 8.2.24 (p) Ecodynamique d'éléments traces en contexte de phytostabilisation aidée par des laitiers dans un sol sableux contaminé en cuivre

Lydie Le Forestier<sup>1</sup>, Mikael Motelica-Heino<sup>1</sup>, Philippe Le  
 Coustumer<sup>2</sup>, Michel Mench<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>Géoressources & Environnement, Pessac

<sup>3</sup>Biodiversité, Gènes & Communautés, Talence

L'écodynamique d'éléments traces potentiellement toxiques, i.e. As, Cr, Cu, et Zn, est étudiée dans des sols fortement contaminés au Cu issus d'un ancien site de traitement du bois (Bordeaux, France). Ces sols alluviaux sableux sont gérés par des solutions de remédiation et phytomanagement, dont l'atténuation naturelle, la phytostabilisation (peuplier, saule) aidée ou non par des amendements organiques (compost) et minéraux (dolomie, fer zérovalent et laitiers) et la phytoextraction (tournesol, tabac). L'objectif est d'acquérir des connaissances sur les mécanismes réactionnels dans le sol, les concentrations et spéciations des contaminants dans des sources d'exposition. Cette étude se focalise sur l'écodynamique du Cu dans ces sols gérés par phytostabilisation aidée par ajout de laitiers d'aciérie enrichis en phosphates. Ces laitiers modifiés peuvent contribuer à l'immobilisation d'éléments du fait de leurs propriétés alcalines. Aussi, les horizons de sol en surface ont été échantillonnés en triplicats dans les lysimètres du site : sols non traités, phytostabilisés sans ou avec amendement de laitiers. Un sol non contaminé prélevé dans la même terrasse alluviale est utilisé comme sol de contrôle. En parallèle des caractérisations physico-chimiques des sols, leur concentration totale en Cu a été déterminée, ainsi que celles dans les fractions obtenues par extractions séquentielles. Les concentrations totales dissoutes (préleveur Rhizon), libres (électrode spécifique) et remobilisables (pool labile, par DGT) ont été mesurées dans les solutions de sols. Enfin, des tests de germination avec des haricots nains ont été conduits complétés par des extractions partielles, afin d'estimer la fraction biodisponible du Cu (concentrations et minéralomasse dans les feuilles primaires). L'ajout de l'amendement alcalin (laitier enrichi en phosphates) fait diminuer la quantité de Cu mobile et mobilisable dans les sols, ainsi que la phytodisponibilité du Cu.

### 8.2.25 (p) Evaluation d'un protocole d'extraction chimique séquentielle pour l'étude de la distribution géochimique des éléments Cu et Zn dans les sédiments du bassin de la Loire

Nicolas Maubec<sup>1</sup>, Hervé Noël<sup>2</sup>, Hélène Pauwels<sup>1</sup>, Xavier Bourrat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>Géo-Hyd, Olivet

Bien que nécessaire en très faible quantité pour une bonne physiologie chez la plupart des êtres vivants évolués, certains métaux tels que le cuivre et le zinc sont régulièrement en excès voire en quantité toxique dans les masses d'eau françaises et posent le problème de l'atteinte du bon état chimique ou écologique de ces dernières. Le comportement des éléments depuis leur source d'émission jusque dans les différents compartiments naturels n'est pas toujours maîtrisé et reste une donnée indispensable et préalable à une remédiation. Selon les origines naturelles ou anthropiques et la minéralogie de la fraction sédimentaire, la spéciation des métaux dans la phase solide est variable. Il s'agit d'une donnée mal connue car difficile à caractériser. Cette spéciation conditionne la remise en suspension potentielle des métaux et leur remobilisation sous forme dissoute dans le milieu environnant.

Cette étude a consisté à optimiser un protocole d'analyse des sédiments par extraction séquentielle, validé sur le bassin de la Loire. Les verrous sont l'évaluation de l'efficacité et de la sélectivité de différents réactifs afin de définir une suite pertinente et robuste de séquences d'extractions. Une étude minéralogique des sédiments, par diffractométrie des rayons-X, microscopie électronique à balayage et spectroscopie Raman, associée aux analyses chimiques de solutions après chaque extraction a

permis de définir ce protocole et d'acquérir la connaissance approfondie de la distribution géochimique des éléments en fonction de 5 classes de constituants ou fractions chimiques : (i) fraction échangeable, (ii) acido-soluble, (iii) oxydable, (iv) réductible ou (v) résiduelle. Ce protocole devrait permettre d'établir une modélisation plus complète des systèmes, à la demande des observatoires soucieux de reconquête de la qualité des milieux.

### 8.3 Rôle de la végétation sur le transfert des éléments chimiques

**Responsables :**

- Priscia Oliva (GET, Toulouse)  
priscia.oliva@get.obs-mip.fr
- Eva Schreck (GET, Toulouse)  
eva.schreck@get.obs-mip.fr
- Sonia Rousse (GET, Toulouse)  
sonia.rousse@get.obs-mip.fr
- Jérôme Viers (GET, Toulouse)  
jerome.viers@get.obs-mip.fr

**Résumé :**

La végétation joue un rôle majeur dans le transfert des éléments chimiques (majeurs et traces) au sein des bassins versants peu ou fortement impactés par les activités humaines. Ce rôle est complexe, multiple et peut se décliner à différentes échelles. Il peut être considéré par exemple à travers l'effet de ligands émis par les racines sur la dissolution des minéraux du sol. Il peut être considéré à travers une forêt considérée comme un réservoir chimique à part entière qui peut être un puits ou une source selon qu'elle se trouve dans un état stationnaire ou non. Il peut également être un vecteur de transfert des éléments via la chaîne alimentaire. Cette session considérera aussi bien des travaux menés à l'échelle du sol (transfert sol plante, processus microbien dans la zone racinaire.....) qu'à l'échelle du bassin versant (bilans géochimiques...). Elle s'intéressera également au transfert de certains éléments chimiques vers les plantes en terme de risque sanitaire (toxicité), biofortification, ou phytoremédiation. Ces travaux pourront s'appuyer sur des approches de terrain, de l'expérimentation en laboratoire ou encore de la modélisation.

### 8.3.1 (o) Utilisation de *Tillandsia capillaris* comme bioindicateur de la pollution atmosphérique urbaine dans la ville d'Oruro, Bolivie : étude cinétique du comportement des éléments métalliques et de leur changement de spéciation

Eva Schreck<sup>1</sup>, Priscia Oliva<sup>1</sup>, Aude Calas<sup>1</sup>, Géraldine Sarret<sup>2</sup>, Sophie Sobanska<sup>3</sup>, David Point<sup>1</sup>, Stéphane Guédron<sup>2</sup>, Fiorella Barraza<sup>1</sup>, Gaëlle Uzu<sup>4</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>3</sup>Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et Raman, Lille

<sup>4</sup>LTHE, Grenoble

L'étude de la pollution atmosphérique par les matières particulaires connaît depuis quelques années un essor important du fait de l'impact de ces particules sur l'environnement mais également de leurs nombreux effets néfastes sur la santé humaine.

Une alternative à l'utilisation de filtres pour identifier les polluants environnementaux contenus dans ces particules tels que les métaux lourds consiste à utiliser des espèces bioindicatrices. Les *Tillandsias capillaris* sont des plantes épiphytes de la famille de Broméliacées qui sont souvent utilisées dans des études de surveillance de la qualité de l'air, car elles puisent tous leurs nutriments de l'atmosphère. L'objectif principal de cette étude était de savoir si cette espèce, adaptée au climat andin, pouvait servir d'espèce bioindicatrice de la qualité de l'air au niveau de la ville d'Oruro où les sources de pollutions sont différentes. Une cinétique de bioaccumulation dans le temps a été réalisée ici en exposant les *Tillandsias* entre 1 et 6 mois dans différentes zones de la ville.

Les résultats font clairement ressortir une forte pollution au niveau de la fonderie d'étain à l'Est de la ville. Au niveau de cette zone, les *Tillandsias* présentent une saturation voire une perte en éléments métalliques à partir de 4 mois d'exposition. Dans le cas de forte pollution métallique, les *Tillandsias* ne sont pas adaptées à un suivi supérieur à 4 mois. Cependant, pour des zones urbaines moins exposées aux métaux atmosphériques, cette plante épiphyte reflète bien les niveaux de métaux présents dans l'air et permet d'intégrer la pollution métallique atmosphérique sur des périodes bien plus longues que ne le permettent les études sur des filtres. L'analyse de la spéciation du Pb et de l'As par EXAFS dans les tissus de *Tillandsias* et dans des filtres passifs met en évidence un rôle de la plante dans la compartimentation et le changement de spéciation de l'As. Pour le Pb, aucun changement de spéciation n'est observé dans la plante par rapport aux capteurs passifs.

### 8.3.2 (o) Potential of *Opuntia ficus-indica* as a long-term biointegrator of atmospheric pollution

Eliane El Hayek<sup>1,2</sup>, Bruno Lartiges<sup>2</sup>, Antoine El Samrani<sup>1</sup>, Veronique Kazpard<sup>1</sup>, Mathieu Benoit<sup>2</sup>, Margot Munoz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université Libanaise, Plateforme de Recherche et d'Analyses en Sciences de l'Environnement, Ecole Doctorale des Sciences et Technologies, Beyrouth, Liban

<sup>2</sup>GET, Toulouse

The monitoring of atmospheric trace elements represents an important challenge in environmental studies and health issues. Several phytoindicators of air quality have been used such as lichens, mosses and mushrooms. However, such species only provide short-term surveys of atmospheric pollution. This study reports the potential of *Opuntia ficus-indica* (Ofi) as a pluriannual biointegrator of heavy metal contamination

during atmospheric dust deposition. Cladodes, roots, and fruits of Ofi as well as soil samples, were collected in the vicinity of three heavily polluted sites, i.e. Selaata fertilizer industry (Lebanon), the roadside of a highway near Sayda (Lebanon), and tailings of a lead-zinc mine (Jebel Ressa in Tunisia). The content in heavy metals was analyzed using Atomic Absorption Spectroscopy and ICP-MS, Scanning Electron Microscopy coupled with Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDXS) was used to characterize the cladode surfaces and the nature of dust deposit, and lead isotopic measurements (TIMS) were performed to identify the origin of Pb. The results show that Ofi is indeed a heavy metal bioaccumulator of Pb and Cd. The lead isotopic composition changes according to the local Pb emission source : For the highway roadside, the Pb isotopic signature in the soil and the cactus (cladodes and roots) essentially identifies unleaded and leaded gasoline, whereas it refers to a natural crustal source in Jebel Ressa mining area. In the industrial area, the isotopic composition in cactus cladodes shifts to more radiogenic gasoline values than those found in roots and soil. These various isotopic signatures indicate that Ofi is a sensitive species to aerial pollution. In the case of Selaata, microscopic examination revealed that the contaminated dust particles are in contact with dispersed calcium oxalate monohydrated crystals which are produced on the cladode surface and might be linked to the metal absorption process. Thereby, the important capacity of Ofi to conserve its ancient aerial reproductive system makes this plant an adequate biointegrator to trace previous source emissions of heavy metals.

### 8.3.3 (o) Influence of mycorrhization and soil organic matters on lead and antimony transfers to vegetables cultivated in urban gardens : environmental and sanitary consequences

Antoine Pierart<sup>1</sup>, Armelle Braud<sup>2</sup>, Thierry Lebeau<sup>2</sup>, Nathalie Sejalon-Delmas<sup>1</sup>, Camille Dumat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EcoLab, Toulouse

<sup>2</sup>LPG, Nantes

The European Environment Agency estimates that c.a. 250 000 sites required clean up and that about 100 000 ha could have been contaminated by metals in Europe. Numerous remediation techniques have been therefore tested and phytoremediation appears as a sustainable and low cost in situ technique particularly for large-scale remediation of polluted arable soils. Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) are already used in phytoextraction or phytostabilisation of many metal(loid)s (Gu et al., 2013, Sharma and Sharma, 2013). However, while plant inoculation with AMF will mostly result of an increase of the plant biomass, the response for lead accumulation in shoots is contrasted (Lebeau et al., 2008). Furthermore, nothing is actually known for Sb transfer to plants phytoremediation-assisted AMF. Yet recently, many researches concern the accumulation of Sb in the environment, its (eco)toxicity and the risk of bioaccumulation in vegetables (Feng et al., 2013), especially in some China areas where Sb mining activities have widely contaminated arable lands (Wu et al., 2011).

Our research project, which is part of a national program for urban gardens (JASSUR, <http://www.agence-nationale-recherche.fr>), focused on polluted soils in associative urban gardens with both geogenic and anthropogenic origins for Pb and Sb. The impact of Pb and Sb on AMF density and diversity was studied using morphological and biomolecular approaches. The role of AMF symbiosis with Lettuce (*Lactuca sativa* L.) on Pb and Sb compartmentalization, speciation and phytoavailability was investigated. The influence of soil organic matters on these processes was examined. Eventually, the part of metal(loid)s available for

humans in case of ingestion of lettuces unfit for human consumption (Foucault et al., 2013 ; Xiong et al., 2013) will be assessed in relation with the influence of AMF symbiosis and organic matter.

### 8.3.4 (o) Effet de la rhizostabilisation de déblais miniers par des plantes métallocoles sur la mobilité de métaux lourds (Zn, Pb et Cd) : Le cas des Avinières

Aline Navel<sup>1</sup>, Jean Martins<sup>1</sup>, Lorenzo Spadini<sup>1</sup>, Jean-Paul Gaudet<sup>1</sup>, Jerusa Schneider<sup>1</sup>, Erwann Vince<sup>1</sup>, Sophie Sebastianutti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LTHE, Grenoble

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de l'installation de plantes métallocoles dans un déblai minier sur l'évolution de la mobilité et de la rétention de métaux lourds tels que le Zn, le Pb, et le Cd. Pour répondre à cet objectif, nous avons développé une approche de lixiviation en colonnes et en lysimètres remplis de déblais de l'ancienne mine des Avinières (St Laurent le minier), stockés dans des bassins de rétention. Des simulations de pluie ont été réalisées tous les 6 mois (pendant 30 mois) sur ces colonnes ou lysimètres végétalisés avec *Anthyllis Vulneraria*, *Festuca arvensis* et *Koeleria vallesiana*, seules ou en mélange. Des facteurs physique et géochimiques ont été suivis au cours du temps (vitesses d'infiltration, pH, concentrations en métaux, bilan ionique...). Ces facteurs varient peu au cours d'un même lessivage mais évoluent fortement avec la croissance des végétaux et le nombre d'espèces. L'augmentation de la vitesse d'infiltration de pluie observée au cours du temps indique que le développement du système racinaire des plantes modifie la structure physique du déblai minier, favorisant ainsi les transferts. Nos résultats montrent aussi que l'installation d'*A. vulneraria* mycorhizée induit la fixation d'azote atmosphérique qui s'accumule dans le sol sous forme de NO<sub>3</sub> avant d'être totalement lessivé, contrairement aux conditions avec graminées où il est rapidement consommé. De plus, l'effet de l'installation du couvert végétal sur le transfert des métaux lourds varie avec leur propre solubilité et aussi avec le nombre d'espèces végétales. Le Pb étant peu soluble, aucun effet n'a pu être observé, contrairement au Zn et au Cd qui présentent un comportement très semblable dans le déblai minier. L'installation d'*A. vulneraria* induit une légère augmentation des concentrations de Zn et de Cd dans les lixiviats. Au contraire, l'augmentation du nombre d'espèces introduites entraîne une forte diminution de ces mêmes concentrations en solution, en deçà des valeurs mesurées dans les témoins non végétalisés. Un mélange d'espèces végétales métallocoles favorise donc la rétention des métaux au sein du déblai et limite donc le transfert hydrique des métaux les plus dangereux en profondeur. Une modélisation hydro-géochimique est en cours afin de mieux comprendre les processus impliqués et de mieux contraindre les approches de phyto-remédiation appliquées à ce type de milieux.

### 8.3.5 (o) Rare earth elements signatures from plant shoot biomass of metallophytes from Katanga (Democratic Republic of Congo)

Olivier Pourret<sup>1</sup>, Bastien Lange<sup>1,2</sup>, Petru Jitaru<sup>1</sup>, Michel-Pierre Faucon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais

<sup>2</sup>Université Libre de Bruxelles

The geochemical behavior of rare earth elements (REE) has been investigated mainly in geological systems where these elements represent the best proxies of processes involving the occurrence of an interface between different media. This behavior is assessed according to REE concentrations recorded along the REE series normalized with respect

to upper continental crust. In this study based on a field approach, the geochemical REE behavior was investigated into plant shoot biomass of an original and unique metalicolous flora (i.e., *Anisopappus chinensis*) grown on extremely copper and cobalt rich soils, deriving from Cu and Co outcrops (Katanga, Democratic Republic of Congo). Among the present species, some are able to accumulate high concentrations of Cu and Co in shoot, which are considered as Cu and Co hyperaccumulators. In this context, the REE behavior would participate to a better understanding of metal accumulation in this flora. The results indicate that REE uptake by plants is not primarily controlled by the total REE concentration in the soil. Indeed, all shoots REE patterns mimic REE soil patterns, whatever the concentration is. Moreover, Eu enrichments occur in aerial parts. Positive Eu anomalies suggest that Eu<sup>3+</sup> can form stable organic complexes in place of Ca<sup>2+</sup> in several biological processes as in xylem fluids associated with the general nutrient flux. The possibility that Eu mobility in these fluids can be enhanced by its reductive speciation as Eu<sup>2+</sup> cannot be ruled out. Eventually, the geochemical REE behavior illustrates that metals accumulation in aerial parts of *A. chinensis* is mainly driven by dissolved complexation and thus available metal in soil solution.

### 8.3.6 (o) Kinetic of foliar Pb transfer for vegetables exposed to PbO nanoparticles

Tian Tian Xiong<sup>1,2</sup>, Christophe Laplanche<sup>2,3</sup>, Eva Schreck<sup>3</sup>, Julie Gabrieli<sup>4</sup>, Stephane Mombo<sup>1,2</sup>, Camille Dumat<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institut National Polytechnique de Toulouse

<sup>2</sup>EcoLab, Toulouse

<sup>3</sup>GET, Toulouse

<sup>4</sup>Université Paul Sabatier-Toulouse

Scientific context and objectives

Due to the global scale atmosphere pollution, the foliar uptake of pollutants was recently investigated with increasing interest. Actually, urban cultures are more and more developed, but atmosphere fine particles enriched with pollutants (PM) can reduce their quality. Most of the available studies focused on the accumulation of metals by plants (Hu et al., 2011). But the kinetic of these transfers was poorly studied. Our main objective was therefore to study the kinetic of foliar transfer in the case of leafy vegetables exposed to Pb-PM.

Methodologies

Lettuce and cabbage were chosen for the study as currently cultivated by farmers and gardeners (Schreck et al., 2014). Then only leaves were exposed to well characterized commercial PbO particles. According to Xiong et al. (2014) the metal foliar exposition was performed during 5, 10, 15 days to allow lead uptake by plant leaves. Four conditions were defined in function of metal quantities deposited according to the PM fallouts of 325 mg cm<sup>-2</sup> week<sup>-1</sup> near a secondary lead smelter reported by Schreck et al. (2013). Then, total lead concentrations in plants were measured every 5 days. Finally, the metal uptake rate, storage capacity and the transfer kinetic were calculated in relation with exposure duration and biomass.

Main results and conclusions

During the experiment period, lead accumulation in plants was positively correlated with both exposure durations and exposure quantities. Total concentrations in lettuce and cabbage were up to 7631 and 5607 mg.kg<sup>-1</sup> respectively : lettuce showed a stronger metal absorption capacity than cabbage. However the finally storage capacity is almost the same in lettuce and cabbage (4.7 mg and 4.6 mg respectively), this may related with the high biomass of cabbage, since storage capacity is both contributed by the uptake capacity and the biomass of plant. Moreover, the metal storage per day shows a dose-dependent manner, during 5,10 and 15 days exposure, the maximum absorption in lettuce were 22.5, 160 and 315.5 μg/ day respectively, and they were 151, 340 and

307  $\mu\text{g}/\text{day}$  in cabbage. In conclusion, vegetable leaves can accumulate significant metal, the potential health risk associated with atmosphere pollution and a guide for sampling vegetables in kitchen gardens will be proposed.

### 8.3.7 (o) Accumulation of Cd in the hyperaccumulating plant *Arabidopsis halleri*

Marie-Pierre Isaure<sup>1</sup>, Stéphanie Hugué<sup>1</sup>, Claire-Lise Meyer<sup>2</sup>, Hiram Castillo-Michel<sup>3</sup>, Denis Testemale<sup>3</sup>, Delphine Vantelon<sup>4</sup>, Pierre Saumitou-Laprade<sup>5</sup>, Nathalie Verbruggen<sup>2</sup>, Géraldine Sarret<sup>6</sup>

<sup>1</sup>LCABIE-IPREM, Pau

<sup>2</sup>Laboratoire de Physiologie et de Génétique Moléculaire des Plantes, Université Libre de Bruxelles, Belgique

<sup>3</sup>European Synchrotron Radiation Facility (ID21 Beamline), Grenoble

<sup>4</sup>Soleil Synchrotron (LUCIA Beamline), Gif-sur-Yvette

<sup>5</sup>Génétique et évolution des populations végétales, Lille

<sup>6</sup>ISTerre, Grenoble

*Arabidopsis halleri* is a Zn, Cd hyperaccumulating plant, which is naturally present in metal contaminated sites and is often mentioned for phytoremediation of soils. It has appeared for several years as a model plant to study metal hyperaccumulation but these mechanisms still remain unclear, particularly for Cd. The aim of this work was to investigate the relationship between the chemical forms of Cd, its distribution in leaves and Cd accumulation and tolerance properties. For that, an interspecific cross was done with its non tolerant and non hyperaccumulating relative *A. lyrata* providing progenies with various Cd tolerance and accumulation phenotypes. Cd speciation and distribution were investigated using X-ray absorption spectroscopy and microfocused X-ray fluorescence. Results showed that Cd compartmentalization differed in both species and highlight the role of cell walls/apoplast in Cd binding. They also indicated that in the non accumulator *A. lyrata* and non tolerant progenies Cd was coordinated by sulfur atoms only or with a small contribution of O/N groups. The proportion of the O/N atoms binding Cd increased in *A. halleri* and tolerant progenies, and they were predominant in some of them, while S ligands were still present. It was thus demonstrated that Cd speciation changed with the tolerance character of the plant.

### 8.3.8 (o) Study of turricules to highlight the influence of earthworm bioturbation on lead phytoavailability and human bioaccessibility

Laura Lagier<sup>1,2</sup>, Thibaut Leveque<sup>1,2</sup>, Stephane Mombo<sup>1,2</sup>, Eva Schreck<sup>3</sup>, Tiantian Xiong<sup>1,2</sup>, Camille Dumat<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Université de Toulouse, INP-ENSAT

<sup>2</sup>EcoLab, Toulouse

<sup>3</sup>GET, Toulouse

#### 1. Introduction and objectives

Further studies are needed in the case of soils polluted by particles enriched with metal(loid)s, to investigate the influence of earthworm activities on metals uptake by vegetables (Leveque et al., 2014) and later their consequences for human health after plant consumption. Actually, vegetables are a major component in the diet of the world's population (Mansour et al., 2009). The following scientific questions were investigated : (i) In the context of health risk assessments, does earthworm activity in soil modify metal concentrations in the edible parts of vegetables ? (ii) What is the influence of bioturbation on human bioaccessibility ?

#### 2. Methodologies

The influence of earthworm activity on soil-to-Lettuce metal transfer was studied by carrying out controlled experiments with rhizotest devices previously described by Uzu et al. (2009). Polluted soils with or without earthworm bioturbation were used. As described by Leveque et al. (2013) various metal concentrations were studied. Soil characteristics, metal concentrations in lettuce and earthworms, ecotoxicity and human bioaccessibility (Foucault et al., 2013 ; Xiong et al., 2014) were measured for the various conditions.

#### 3. Main results and conclusions

Earthworm activities increased the metals concentrations in lettuce leaves. Pb and Cd concentrations in lettuce leaves can increase up to 46% with earthworm activities. These results and the low correlation between estimated by CaCl<sub>2</sub> and EDTA and measured pollutant phytoavailability suggest that earthworm bioturbation was the main cause of the increase. Bioturbation could affect the proximity of pollutants to the roots and soil organic matter. We therefore concluded that the observed increase in metal phytoavailability was mainly due to the increase in soil macroporosity and metal bioaccessibility for roots. This phenomenon could have health consequences in terms of human exposure when vegetables grown in polluted soils are consumed.

### 8.3.9 (o) Etude des transferts élémentaires et des mécanismes biogéochimiques impliqués dans le continuum sol-vigne-vin

Simon Blotvogel<sup>1</sup>, Priscia Oliva<sup>1</sup>, José Darrozes<sup>1</sup>, Jerome Viers<sup>1</sup>, Stephane Audry<sup>1</sup>, Pierre Courjault-Radé<sup>1</sup>, Laurent Orgogozo<sup>1</sup>, Eva Schreck<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

Bien que le rôle direct de la géologie, en particulier de la chimie du sol, dans la notion complexe de terroir en viticulture n'est pas à ce jour démontré, il s'avère que les teneurs en éléments minéraux et leur transfert dans le système sol-vigne-vin représentent un intérêt majeur.

Le fonctionnement biogéochimique de 2 sols viticoles contrastés a ainsi été caractérisé à l'échelle d'un domaine viticole dans le piémont des Alpes du Sud en Italie. La production viticole en conduite biologique et en système de pergola sur 2 parcelles distinctes montre des différences organoleptiques significatives malgré des terroirs aux propriétés semblables (mêmes cépage et porte-greffe, procédés de vinification, topographie). En revanche, ces parcelles se situent sur deux lithologies distinctes, basalte et calcaire, et de ce fait, sur des sols différents.

La méthodologie mise en place a permis une analyse morphologique et minéralogique fine des sols, une évaluation de la phytodisponibilité via des extractions chimiques (CaCl<sub>2</sub> et citrate), un bilan hydrologique des parcelles et la détermination des signatures élémentaires (géochimie et isotopie du Cu et du Zn) dans les sols, les organes de la vigne et les vins qui en sont issus. Enfin, l'état physiologique de la vigne a été évalué via l'utilisation de l'indice lipidique  $\omega_3$ .

Les premiers résultats montrent une différence de phytodisponibilité des éléments nutritifs entre les 2 parcelles et un meilleur fonctionnement photosynthétique des plantes sur sols carbonatés. Outre les facteurs physiologiques des plantes et le stress hydrique, des facteurs abiotiques liés à la minéralogie des sols et à la disponibilité des éléments comme le Ba et le Sr ainsi que les oligoéléments indispensables à la plante (Zn et Cu) pourraient expliquer l'implication de la composante « sol » dans l'effet terroir en viticulture.

### 8.3.10 (o) Effect of chlorine transformation in soil and vegetation on its accumulation and cycling dynamics

Yves Thiry<sup>1</sup>, Paul-Olivier Redon<sup>1</sup>, Malin Gustavsson<sup>2</sup>, David Bastviken<sup>2</sup>, Laura Marang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ANDRA, Chatenay Malabry

<sup>2</sup>Linköping University, Suède

<sup>3</sup>EDF R&D, Chatou

While chlorine is worldwide used as a pillar of the chemical chemistry for more than 100 years to produce a huge variety of compounds, the biogeochemistry of that element remains puzzling and its ecological role still poorly understood. Chlorine is very soluble at a global scale with chloride (Cl<sup>-</sup>), the dominating form. Because of its high solubility, chlorine was usually perceived as a good conservative tracer in hydrological studies and by analogy as little reactive in biosphere. However, it is now admitted that chlorine participates in fact in a complex biogeochemical cycle, which involve a non-conservative behavior, notably because of natural processes of organic matter (SOM) chlorination (Öberg, 1998) mainly occurring in surface soils and mediated by microbial activities on a large extent (Bastviken et al., 2007). Our recent studies have strengthened the view that an organic cycle for chlorine should now be recognized, in addition to its inorganic cycle. Major results showed that :

- organochlorine (Clorg) formation occurs in all type of soils and ecosystems (culture, pasture, forest), leading to an average fraction of the total Cl pool in soil of about 80 % (Redon et al., 2012),
- chlorination in more organic soils over time leads to a larger Clorg pool and in turn to a possible high internal supply of inorganic chlorine (Clin) upon dechlorination. (Gustavsson et al., 2012),
- average Cl residence time in forest soils calculated for Clin and Clorg together was 5-fold higher than the residence time estimated for Clin alone (Redon et al., 2011),
- locally, Cl amount taken up by vegetation is much larger than atmospheric deposits, the Cl in excess being recycled mainly by throughfall (Thiry, 2010),
- Cl root uptake and transformation rates in soils are essential to calibrate dynamic compartment models since those processes control the persistence of chlorine in the whole system but data are still deficient for different land uses (Van den Hoof & Thiry, 2012).

### 8.3.11 (p) Interaction sols-vegetations dans la région d'Annaba (N.E. Algérie) : étude chimique comparative

Ahmed Arafa<sup>1</sup>, Menana Daif<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Géodynamique et ressources naturelles, Université de Annaba, Algérie

Dans la région Nord Ouest de Annaba, l'essentiel des sols et de la végétation se répartissent de la manière suivante :

- Sur les hauteurs de plus de 600 mètres et surtout vers les sommets humides du massif cristallin de l'Edough, poussent sur un sol brun du chêne-liège (*Quercus suber*) exploité pour le liège ; du Chêne Zeen (*Quercus mirbeckii*), du pin maritime et de rares châtaigniers.
- Sur les calcarénites quaternaires se développe un sol brun à ocre. Les arbres y sont rares. C'est un maquis à bruyère arborescente, ciste, lentisque, myrte, arbousier, daphné, smilax, chêne kermès, calycotome épineux (guendoul), palmier nain (doum), et diss.
- Au fond des vallées, avec un engorgement quasi permanent, on trouve de rares sols grisâtres hydromorphes où poussent des joncs, carex, typha... On trouve également quelques arbrisseaux de tamaris dans le lit des petits oueds côtiers, tout près du rivage..
- Sur les versants à forte pente, le sol ne peut se développer car régulièrement réduit par transport gravitaire, on trouve de minces pellicules de sols d'érosion peu évolués. Quand la pente n'est pas trop forte, il se développe des sols rougeâtres peu profonds, sur roches cristallines, où domine une végétation acidophile : fougères, genêts, ajoncs, bruyères.

L'étude comparée des éléments majeurs et de cinq éléments traces montre qu'il y a une interaction entre la végétation et le sol. De plus une nette corrélation existe entre la nature de la roche mère (marneuse, gneissique, granitique..) et le type de pédogenèse. La composition minéralogique intervient sur les caractères de la fraction minérale du sol ; de même que la structure et la dureté conditionnent largement la vitesse de la dégradation.

### 8.3.12 (p) Trace metals in phosphate fertilizers : Cadmium behavior in Lebanese soils

Valérie El Kazzi<sup>1,2,3</sup>, Bruno Lartiges<sup>2</sup>, Antoine El Samrani<sup>3</sup>, Ahmad Kobeissi<sup>3</sup>, Veronique Kazpard<sup>3</sup>, Laurence Denaix<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Lebanese Agriculture Research Institute, Fanar, Liban

<sup>2</sup>GET, Toulouse

<sup>3</sup>Plateforme de Recherche et d'Analyses en Sciences de l'Environnement, Ecole Doctorale des Sciences et Technologies, Faculté des Sciences, Université Libanaise, Hadath, Liban

<sup>4</sup>INRA, Bordeaux

Phosphate fertilizers are extensively used to increase crop production but are major sources of metal contamination in soils. These metals can be harmful to environment and human due to their persistent in soil and potential to enter human food chain. Phosphorus can be found in the market as simple, triple, super phosphate, mono and di-ammonium phosphate (SSP, TSP, MAP, DAP...). A survey of phosphate fertilizers was undertaken to quantify trace metals input via fertilizers to Lebanese soils. A total of 50 chemical phosphate fertilizers were collected from Lebanese market. Crystallography, mineral phases and chemical structure investigations were determined respectively by X-ray diffraction and Fourier Transform infrared spectroscopy. In parallel, elemental compositions were analyzed by using X-ray fluorescence spectroscopy and atomic absorption spectroscopy. A Principal Component Analysis (PCA) of the different parameters was performed to provide hints as to which phosphate fertilizer possesses the greatest potential to contaminate the soil with trace metals. The average metal levels in the fertilizers were respectively 3 ; 14 ; 496 and 67 (mg/kg) for Cd, Pb, Zn, and Cu. Fifty percent of the samples had the trace metals concentrations below 2 ; 12 ; 153 and 24 (mg/kg) for Cd, Pb, Zn, and Cu respectively. Cadmium and sulfate were abundant in superphosphate, Zinc and Copper in NPK fertilizers and Lead was abundant in potassium phosphate. These elements were also found in urea-phosphate samples but with less concentration comparing to the other. All the trace metals were positively correlated with the phosphate concentrations whereas Cadmium and Calcium were also correlated to the sulfate phase. The input of trace metals to the soil were beyond the limit set by European countries. A template of soil columns contaminated with cadmium coming from phosphate fertilizer showed a significant transfer of this metal to lettuce leaves. Moreover, cadmium diffused throughout the first 10cm of the soil columns but without showing a significant difference in behavior between compacted and non-compacted soils.

### 8.3.13 (p) Phytomanagement of an old bauxite mine (Serra da Brígida, Minas Gerais, Brazil) : evaluation of metal transfert in plant

Maurílio Figueiredo<sup>1</sup>, Arnaud Gauthier<sup>2</sup>, Alessandra Kozovits<sup>3</sup>, Mariangela Garcia Praça Leite<sup>1</sup>, Michel Dubois<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Geology, Federal University of Ouro Preto, Ouro Preto, Brésil

<sup>2</sup>LGCgE, Lille

<sup>3</sup>Department of Biology, Federal University of Ouro Preto, Ouro Preto, Brésil

From all the impacts caused by mining activity, the complete removal of vegetation and superior soil layers are particularly destructive to natural ecosystems. Among the mostly tested methods, recovering of degraded surfaces with topsoil is undoubtedly the most efficient in restoring as the soil layer act as a source of organic matter and microorganisms, and can function as seed bank. However, in many mining areas, topsoil is very thin and usually is not stocked or lengthy storage periods greatly reduce its regenerative potential. Consequently, a large number of mines remain abandoned with no effective restoration efforts.

An alternative approach to optimize the process of revegetation for commercial purposes or for restoration of mined areas lacking topsoil is the use of available waste materials, crushed to enable plants fixation and the use of indigenous species.

Located on the east slope of Serra da Brígida, east of the Quadrilátero Ferrífero in Minas Gerais (Brazil), the study area was mined for bauxite during the 1960s and has been abandoned since this time without receiving any restoration efforts. This site is characterized by cambisols, which formed over colluvial material with a shallow topsoil layer (thickness of up to 20 cm). Only small patches of native vegetation were observed in situ, associated with laterite fractures or with small and shallow depressions containing small sized laterite particles.

The experimental growing of *Eremanthus erythropappus*, a native woody species, was performed on various substrates (topsoil, crushed laterite or exposed laterite) from old site. After growth period, several parts of plants (roots, leaves, stems) were embedded in epoxy resin and then polished. Scanning Electron Microscope observations were performed on these polished slices. The localization of metals and evaluation of their concentrations permits a better understanding of transfer mechanisms from soil to plants.

### 8.3.14 (p) Optimization of Phyto-Extraction using plant roots exudates : Role of Natural Organic Acids

Haixiao Li<sup>1</sup>, Arnaud Gauthier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LGCgE, Lille

The phytoremediation, especially the phytoextraction, is regarded as an adjective and economic method to deal with the heavy metal contamination of the soil. However, it is far to be called an ideal measure, because of its low efficiency to accumulate the heavy metals. As it mostly depends on the mobility of the metals in the soil and the extraction ability of the hyperaccumulators, some researchers have showed that the root exudates may play an important role to enforce the phytoremediation.

In this work, we will talk about the main part of the root exudates, the LMWOAs (low molecular weight organic acids) and their effects on the phytoextraction. By using the methods of the liberation kinetic, the sequential extraction and the hydroponic culture, we will see how the five chosen acids (citric acid, malic acid, tartaric acid, oxalic acid and succinic acid) affect the mobility of the heavy metals in the soil and the translocation process of the metals in the plants and the difference of the effects between the heavily contaminated soil and the lightly polluted one in Evin Malmaison, France.

### 8.3.15 (p) Metal bioaccessibility to refine human health risk assessment : case of Pb and Cd pollution in kitchen gardens

Stéphane Mombo<sup>1</sup>, Yann Foucault<sup>1</sup>, Muhammad Shahid<sup>2</sup>, Irène Gaillard<sup>3</sup>, Sylvaine Goix<sup>4</sup>, Eva Schreck<sup>4</sup>, Antoine Pierart<sup>1</sup>, Camille Dumat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EcoLab, Toulouse

<sup>2</sup>COMSATS Insititute of Information Technology, Vehari, Pakistan

<sup>3</sup>Centre d'Etude et de Recherche Travail Organisation Pouvoir, Toulouse

<sup>4</sup>GET, Toulouse

#### 1. Importance of the work and objectives

As gardening activities are actually increasingly developed at the global scale (Schwartz et al., 2013), the question of sanitary risk due to polluted vegetables consumption is crucial (Xiong et al., 2014).

#### 2. Methodologies

Total and bioaccessible (Foucault et al., 2013; Denys et al., 2007) concentration of Cd and Pb were measured for various polluted vegetables and soils near a lead recycling factory. The bioaccumulation factors were determined (Shahid et al. 2012).

#### 3. Main results and conclusions

Soil of four gardens was moderately contaminated by Pb and Cd. The bioavailability, bioaccumulation and bioaccessibility of Pb and Cd vary with soil physic-chemical properties and plant type. Generally the soils of kitchen garden with high organic matter and carbonate contents showed less soil-plant transfer of metals. The metal uptake trend among different vegetables varies with metal type. In case of Pb, maximum uptake was by lettuce followed by leek, celery, carrot and celeriac. For Cd, the accumulation trend was lettuce > celeriac > celery > carrot > leek. It is proposed that human bioaccessible fraction of metals and bioaccumulation factors could be measured in risk assessment studies. Moreover, application of soil amendments which increase soil organic matter can be used as management practice for moderately contaminated kitchen garden soils.

### 8.3.16 (p) Assessing the effect of organic amendments on soil properties, nickel availability in soil and uptake by *Trifolium alexandrinum* L.

Muhammad Shahid<sup>1</sup>, Antoine Pierart<sup>2</sup>, Muhammad Sabir<sup>3</sup>, Abdul Ghafoor<sup>3</sup>, Camille Dumat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>COMSATS Insititute of Information Technology Vehari, Pakistan

<sup>2</sup>EcoLab, Toulouse

<sup>3</sup>Institute of Soil and Environmental Science, University of Agriculture, Faisalabad, Pakistan

Nickel is reported to be a necessary trace element for living organisms due to its essential roles in the metabolisms. However, at high levels, Ni may cause toxic effects to physiological and biochemical process in plants. Organic amendments can modify metals speciation and their biogeochemical behavior in ecosystem. The organic ligands are able to desorb metal from soil matrix into soil solution and facilitate metal plant uptake. The objective of this study was to determine the effect of various organic amendments on Ni uptake by *Trifolium alexandrinum* L. (*T. alexandrinum*).

A pot experiments was carried out under controlled greenhouse condition. Four types of organic amendments viz. poultry manure (PM), farm yard manure (FM), activated carbon (AC) and press mud (PrM) were added to Ni contaminated soil. Nickel was applied as NiCl<sub>2</sub> at three levels; 30, 60 and 90 mg.kg<sup>-1</sup>. All four organic amendments (PM, FM, AC and PrM) were applied at 15 g.kg<sup>-1</sup> soil. Each pot contained 15 seeds of *T. alexandrinum* and 10 kg soil. After a one week early growth period, five plants were retained for treatment exposure. Plants were harvested after 90 days of treatment exposure. The following soil and plant parameters were measured : for soil ; ECe, pHs, OM, CaCO<sub>3</sub> and AB-DTPA extractable Ni and for plant ; Ni concentration and uptake by *T. alexandrinum*.

Application of organic amendments affected Ni contents in plants. However, it varied with soil Ni level. FYM, PM and PrM significantly increased Ni phytoextraction at low Ni level in soil (Ni-0 to Ni-60); it has no effect at higher level (Ni-90). However, the effect of AC was non-significant at lower Ni levels in soil. Several previous studies found contrasted results about the interaction between metals and organic amendments : some observed a significant increased metal uptake under organic amendments application, whereas others observed a decrease. This is because both the metal-organic ligands interaction and uptake by plants are affected by stoichiometric ratio, in addition to plant and soil characteristics.

The results of our study showed that organic amendments significantly affect soil OM, pH, AB-DTPA extractable Ni and Ni uptake by *T. alexandrinum*. It is concluded that Ni soil levels and amendment type must be considered while using these amendments in Ni remediation and risk assessment studies.

## 8.4 Rôle des microorganismes sur le devenir des hydrocarbures dans les différents compartiments terrestres

### Responsables :

- Cristiana Cravo-Laureau (EEM-IPREM, Pau)  
cristiana.cravo-laureau@univ-pau.fr
- Robert Duran (EEM-IPREM, Pau)  
robert.duran@univ-pau.fr
- Anthony Ranchou-Peyruse (EEM-IPREM, Pau)  
anthony.ranchou-peyruse@univ-pau.fr

### Résumé :

Cette session est focalisée sur la microbiologie environnementale qui vise à comprendre le rôle des microorganismes dans le devenir des contaminants organiques, plus particulièrement les hydrocarbures dans l'environnement. Les microorganismes impliqués dans les différents cycles biogéochimiques jouent un rôle important dans la dégradation de ces composés, comprendre les interactions entre les différents cycles et les mécanismes impliqués est un enjeu majeur des recherches actuelles.

Les contributions dans les domaines de la remédiation, atténuation naturelle et décontamination dans les environnements tels que sols, eaux, sédiments marins, aquifères et réservoirs pétroliers sont attendues. L'implication des microorganismes dans les différents cycles biogéochimiques ainsi que les développements techniques et expérimentaux seront également sollicités.

### Mots-clés :

Microorganismes, géomicrobiologie, hydrocarbures, biodégradation.

### 8.4.1 *Keynote communication* : Dynamique des hydrocarbures dans les écosystèmes marins côtiers bioturbés

Philippe Cuny<sup>1</sup>, Cécile Militon<sup>1</sup>, Cristiana Cravo-Laureau<sup>2</sup>, Christine Cagnon<sup>2</sup>, Patricia Bonin<sup>1</sup>, Valérie Michotey<sup>1</sup>, Ronan Jézéquel<sup>3</sup>, Franck Gilbert<sup>4</sup>, Robert Duran<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MIO, Marseille

<sup>2</sup>EEM-IPREM, Pau

<sup>3</sup>Cedre, Brest

<sup>4</sup>EcoLab, Toulouse

Les hydrocarbures (HC) pétroliers constituent une classe de contaminants majoritaire des écosystèmes marins (Head et al., 2006). Ce sont des molécules hydrophobes qui peuvent, pour certaines, persister dans l'environnement, se concentrer dans la biomasse au sein des réseaux trophiques (phénomène de bioaccumulation et de bioamplification), et être cancérigènes et/ou mutagènes pour les organismes (e.g. hydrocarbures aromatiques polycycliques). Comprendre et anticiper le devenir et l'impact des hydrocarbures dans les écosystèmes marins demeurent une problématique environnementale et scientifique de première importance dans un monde dominé par l'utilisation du pétrole et de ses dérivés. Les processus biotiques et abiotiques qui affectent le devenir des hydrocarbures sont, dans l'ensemble, assez bien compris. Cependant, il demeure encore difficile de faire des prédictions fiables sur le devenir et l'impact d'une pollution par les HC du fait des nombreuses interactions entre processus biotiques et abiotiques mais aussi de la complexité inhérente aux écosystèmes marins. C'est particulièrement le cas en ce qui concerne les matrices sédimentaires où, suite à leur introduction, une partie des HC vont s'accumuler (Cuny et al., 2011). A l'interface eau-sédiment et dans la colonne sédimentaire, la dégradation de la matière organique et donc des HC est liée en grande partie à l'activité des différents métabolismes bactériens se manifestant en aérobie et/ou en anaérobie. La bioturbation, que ce soit par remaniement sédimentaire, irrigation des terriers ou par l'activité alimentaire, générée par la macrofaune benthique, va réguler la répartition et l'expression de ces différents métabolismes. L'étude des interactions entre la macrofaune et la microfaune revêt donc un intérêt particulier lorsqu'on s'intéresse aux processus affectant le devenir des HC dans la matrice sédimentaire.

#### Références

Cuny, P., Cravo-laureau, C., Grossi, V., Gilbert, F., Militon, C. (2011) Biodegradation of Hydrocarbons in Bioturbated Marine Sediments. In : Koukkou, A.-I. (ed) Microbial Bioremediation of Non-metals : Current Research, Caister Academic Press, pp. 55-92.

Head, I.M., Jones, D.M., Roling, W.F.M. (2006) Marine microorganisms make a meal of oil. Nat. Rev. Microbiol. 4 : 173-182.

### 8.4.2 (o) Importance des bactéries benthiques et de la méiofaune marine dans la biodégradation de l'antracène sédimentaire

Olfa Ben Said<sup>1,2</sup>, Hela Louati<sup>1</sup>, Amel Soltani<sup>1</sup>, Hugues Preud'homme<sup>3</sup>, Cristiana Cravo-Laureau<sup>2</sup>, Patrice Got<sup>4</sup>, Olivier Pringault<sup>4</sup>, Patricia Aissa<sup>1</sup>, Robert Duran<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Biosurveillance de l'Environnement, Zarzouna, Tunisie

<sup>2</sup>EEM-IPREM, Pau

<sup>3</sup>LCABIE-IPREM, Pau

<sup>4</sup>ECOSYM, Montpellier

Une expérimentation de bioremédiation de sédiment marin contaminé par l'antracène a été élaborée afin d'évaluer le rôle des interactions

biotiques dans le devenir de l'antracène. Les biotraitements de bioremédiation testés étaient la biostimulation (BS), la bioaugmentation (BA) par ajout d'une souche bactérienne hydrocarbonoclaste et en combinant biostimulation et bioaugmentation (BS+BA). Les microcosmes ont été contaminés (C) par 1 ppm d'antracène. Après 40 jours d'incubation, la biodégradation de l'antracène a été estimée, l'abondance et la diversité des communautés bactériennes et méiofauniques (nématodes, copépodes, oligochètes, polychètes et divers) ont été déterminées. Dans les sédiments non contaminés, la BS a entraîné une prolifération des nématodes au détriment des autres taxons, une augmentation de la biomasse des bactéries indigènes et une légère dégradation de l'antracène (24%±3%). La BA améliore la biodégradation de l'antracène et réduit la toxicité des sédiments vis à vis de la méiofaune (46%±2%). Cette biodégradation a été plus importante avec l'ajout d'antracène (62%±2, 65%±3, 72%±2%, CBS, CBA, CBS+BA, respectivement). La bioaugmentation a entraîné une réduction de la biomasse et de la diversité des communautés bactériennes benthiques. Une prolifération des nématodes a été également observée. Le biotraitement, combinant BS+BA été le plus efficace dans l'élimination de l'antracène. Ce traitement a permis l'augmentation de l'abondance des bactéries indigènes réduisant considérablement la toxicité du sédiment et permettant le rétablissement de l'abondance et de la diversité de la méiofaune. Selon le traitement appliqué, les analyses canoniques de correspondances ont montré différentes corrélations entre la structure des communautés bactériennes et la diversité de la méiofaune. Ces observations révèlent l'importance des interactions biologiques complexes dans la mise en place des assemblages bactériens impliqués dans la dégradation de l'antracène.

### 8.4.3 (o) Etude expérimentale et numérique de la biodégradation d'un polluant organique non miscible en milieu poreux

Tidjani Bahar Bahar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GéoRessources, Nancy

La contamination des ressources en eau souterraine par une phase organique non miscible à l'eau couramment appelé NAPL (Non Aqueous phase Liquid) constitue aujourd'hui un défi scientifique majeur compte tenu de la durée de vie d'un tel polluant. Bien que l'activité bactérienne (généralement présente sous forme de biofilm) joue un rôle crucial dans le devenir à long terme de ces effluents, peu d'études existent à l'heure actuelle sur l'étude de ces processus dans des conditions multiphasiques (i.e., à proximité de la source). Le NAPL se retrouve souvent piégé, en effet, sous l'action des forces capillaires, dans la zone saturée sous forme de gouttelettes à au niveau des pores. Ce comportement spécifique au polluant modifie la dynamique du système biofilm/milieu poreux saturé où d'importantes questions restent encore ouvertes : accessibilité du polluant, modification de la tension interfaciale, production de biosurfactant, effet de toxicité (inhibition de la croissance bactérienne). Nous utiliserons ici une approche expérimentale et théorique pour tenter de répondre à ces questions. Le transport et la biodégradation du toluène en présence de bactéries (*P. putida* F1) seront ainsi observés à l'échelle du pore à l'aide d'un milieu poreux transparent 2D. Cette approche expérimentale permet d'avoir des images représentatives du système eau/biofilm/toluène. Des résultats sur la biodégradation du toluène en batch et des essais préliminaires d'injection dans la cellule expérimentale sont présentés. En parallèle, un modèle macroscopique décrivant le transport multiphasique en milieu poreux pour un système eau/NAPL/biofilm a été développé. Une méthode de prise de moyenne volumique a été appliquée ici aux équations à l'échelle du pore pour effectuer le changement d'échelle et dériver ce modèle. L'influence des caractéristiques microscopiques (arrangement des grains, fraction volumique du biofilm, valeurs des constantes d'inhibition...) sur les propriétés effectives du milieu (coefficient de dispersion, cinétique apparente

de dégradation) sera discutée au travers de quelques résultats issus des simulations.

#### 8.4.4 (o) Atténuation naturelle potentielle de BTEX en aquifère de stockage de gaz

Anthony Ranchou-Peyruse<sup>1</sup>, Thomas Aullo<sup>2</sup>, Sabrina Berlendis<sup>1</sup>,  
 Michel Magot<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EEM-IPREM, Pau

<sup>2</sup>TIGF, Pau

La France est dépendante en gaz naturel dont elle importe 98% de sa consommation. Comme pour plusieurs autres pays (Etats-Unis, Canada, Grande Bretagne, Autriche, Allemagne, etc.), le stockage de gaz est principalement réalisé afin de pallier aux variations saisonnières de consommation. Grâce aux spécificités géologiques de notre territoire, ce stockage se fait essentiellement aux niveaux d'aquifères très profonds (-500 à 1000 mètres).

Le gaz naturel contient en majorité du méthane mais également des traces d'autres composés tels que les BTEX (Benzène, Toluène, Ethylbenzène et les trois isomères du Xylène). Ces hydrocarbures monoaromatiques peuvent se solubiliser dans l'eau de formation aux niveaux des interfaces eau/gaz. Leur biodégradation est bien moins rapide en anaérobie qu'en aérobie mais un potentiel d'atténuation naturelle des BTEX par les communautés microbiennes indigènes a déjà pu être démontré lors de travaux antérieurs.

Une communauté bactérienne a montré une dégradation séquentielle d'éthylbenzène, de toluène et de benzène en 250 jours d'incubation dans des conditions de sulfato-réduction. La biodégradation a été confirmée par le fractionnement isotopique accru du carbone et de l'hydrogène ( $4.0 \pm 0.2\%$  et  $101.5 \pm 26.2\%$ , respectivement). L'étude de diversité moléculaire, ainsi qu'une approche culturale ont montré que la communauté n'était composée que de deux espèces bactérienne appartenant au même genre *Desulfotomaculum*. Bien que nous ne puissions assigner un rôle à chaque population de *Desulfotomaculum* quant à la dégradation des hydrocarbures mono-aromatiques, cette étude suggère un rôle important des représentants du genre *Desulfotomaculum*. Cette communauté simplifiée représente le premier modèle simplifié de microorganismes anaérobies dégradant les hydrocarbures originaire d'un environnement très profond (-760m).

#### 8.4.5 (o) Impact de l'addition de Rhamnolipide dans un sol dopé avec du Phénanthrène (PHE) : adsorption, dégradation et bactéries impliquées

Marc Crampon<sup>1</sup>, Josselin Bodilis<sup>1</sup>, Aurélie Cébron<sup>2</sup>, Fabrice Bureau<sup>3</sup>,  
 Franck Le Derf<sup>1</sup>, Nadine Merlet-Machour<sup>1</sup>, Florence Portet-Koltalo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>COBRA, Evreux

<sup>2</sup>LIEC, Nancy

<sup>3</sup>ECODIV, Université de Rouen, Mont-Saint Aignan

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), polluants toxiques persistants, présentent un caractère de géo-accumulation. En fonction de leur forme chimique et des caractéristiques du sol, ils sont plus ou moins fortement séquestrés et l'efficacité des procédés de bioremédiation est alors intimement liée à la biodisponibilité des HAP pour les micro-organismes dégradeurs du sol. L'addition de biosurfactants, notamment de type rhamnolipide dans un sol pollué a largement été décrite comme permettant de remobiliser les HAP adsorbés et d'augmenter ainsi leur biodisponibilité, mais l'étude de son impact sur les communautés bactériennes dégradantes reste mal connue. L'objectif de

cette étude est donc d'étudier (i) son impact sur l'adsorption du PHE, (ii) sur les cinétiques de dégradation et (iii) sur les souches dégradantes sur 2 sols aux propriétés physico-chimiques contrastées.

(i) L'étude de l'impact du rhamnolipide (glycolipide) sur l'adsorption du PHE a été réalisée par des isothermes d'adsorption à 25°C et comparée à un autre surfactant (cyclolipopeptide de type viscosine). Le rhamnolipide a montré une plus grande capacité à désorber le PHE, avec une efficacité 3 à 4 fois supérieure comparativement à la viscosine, qui n'a pas eu d'impact visible sur la désorption du PHE.

(ii) L'impact de l'ajout de rhamnolipide sur les cinétiques de dégradation du PHE a été réalisé en microcosmes (avec et sans rhamnolipide), avec suivi de la concentration en PHE sur 30 jours. Bien que le rhamnolipide ait un impact sur la désorption du PHE, un faible impact a en revanche été observé sur les cinétiques de dégradation. (iii) Une nouvelle série de microcosmes avec dopage à 300 mg/kg avec du PHE 13C a permis de caractériser les bactéries dégradant le PHE par la méthode du DNA Stable Isotope Probing (DNA-SIP), et d'observer l'impact du rhamnolipide sur l'implication de certaines souches bactériennes dans la dégradation.

L'impact de l'addition de rhamnolipide dans un sol pollué par du PHE a donc pu être caractérisé tant sur le plan de l'adsorption que sur le plan microbiologique.

#### 8.4.6 (o) Management des ressources microbiennes indigènes pour l'optimisation des stratégies de dépollution

Olivier Sibourg<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ENOVEO, Lyon

Quelque soit la nature du polluant ciblé ou de la matrice environnementale (aquifère, sol, sédiment...), la réussite d'un projet de bioremédiation est conditionnée par la prise en compte de deux composantes essentielles. La première est la présence de communautés microbiennes indigènes (CMI) pouvant être stimulées afin de favoriser leur activité de biodégradation. La seconde est la biodisponibilité de la pollution, qui peut être influencée par les caractéristiques physico-chimiques du site. Le management des ressources microbiennes et une bonne compréhension de leurs mécanismes impliqués dans ces phénomènes de biodégradation est alors un atout majeur quant à la réussite de tels projets.

Dans ce cadre, le but du travail réalisé par ENOVEO est d'anticiper l'évolution de l'activité des CMI afin d'optimiser la mise en œuvre de la stratégie de dépollution. La prise en compte des outils de biologie moléculaire depuis l'élaboration du plan de gestion jusqu'au traitement sur site permet d'améliorer l'appréhension de certaines contraintes liées à la transposition d'échelle. Ainsi, l'identification de biomarqueurs spécifiques des voies de biodégradation d'intérêt, combinée à une cartographie de ces biomarqueurs sur site, permet de définir en amont les conditions optimales (oxygénation, température, disponibilité en nutriments carboné ou azoté...) pour le management des ressources microbiennes d'intérêt.

La présentation s'articulera autour du scénario de la réalisation d'un traitement sur site par mise en andains de terres impactées par des hydrocarbures. Pour chacune des étapes de cette approche innovante, du plan de gestion à la dépollution (étude préliminaire, caractérisation initiale, monitoring de la bioremédiation...), les résultats de cas d'études et nos retours d'expériences sur le traitement des hydrocarbures dans les sols, illustreront les réponses apportées par l'utilisation des outils de biologie moléculaire permettant de caractériser l'interaction entre les bactéries indigènes, la biostimulation réalisée et les mécanismes de biodégradation des hydrocarbures.

#### 8.4.7 (p) Les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans le bassin versant du complexe lac Ichkeul-lagune de Bizerte (Tunisie) : présence et impact sur les communautés bactériennes

Fida Ben Salem<sup>1</sup>, Olfa Ben Said<sup>2</sup>, Mathilde Monperrus<sup>3</sup>,  
 Robert Duran<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EEM-IPREM, Pau

<sup>2</sup>Laboratoire de Biosurveillance de l'Environnement, Zarzouna,  
 Tunisie

<sup>3</sup>LCABIE-IPREM, Pau

Le complexe lac Ichkeul-lagune de Bizerte est entouré des zones industrielles, dont une industrie de raffinage de pétrole, sur son bassin versant. Il est aussi soumis à la menace de contamination par les hydrocarbures du trafic maritime intense du port de Bizerte-Menzel Bourguiba. Le lac Ichkeul est protégé par des conventions internationales : RAMSAR(1980), MAB(1977), il est classé comme site naturel du Patrimoine Mondial par l'UNESCO. L'hydrologie du complexe est saisonnière, en hiver le lac Ichkeul est alimenté en eau douce par les rivières d'où une élévation du niveau d'eau ce qui provoque un déversement d'eau vers la lagune de Bizerte à travers l'oued Tinja. En été, l'évaporation intense et l'arrêt de l'alimentation par les oueds entraînent une baisse du niveau d'eau dans le lac d'où un passage de l'eau lagunaire vers le lac Ichkeul via l'oued Tinja. La présente étude consiste à investiguer la contamination des sédiments par les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) aux deux saisons hivernale et estivale afin de déterminer l'influence de la lagune sur le lac d'un point de vue écotoxicologique.

Les analyses des 16 HAP dans les sédiments ont été réalisées selon la méthode QuEChERS. La biodiversité des communautés bactériennes des sédiments a été déterminée par T-RFLP. Toutes les molécules recherchées ont été détectées dans les sédiments du complexe à des teneurs variables qui atteignent 20 ppm de HAP totaux. Les résultats de ces analyses chimiques ont montré nettement que la lagune de Bizerte est beaucoup plus contaminée en HAP que le lac Ichkeul. Les analyses canoniques de correspondances révèlent l'impact des HAP sur la diversité bactérienne. La comparaison entre les saisons montre que la structure des communautés bactériennes du lac sont fortement influencées par les HAP en été indiquant clairement l'influence de la lagune de Bizerte sur le lac à cette saison à travers le passage d'eau lagunaire contaminée en HAP vers le lac Ichkeul.

#### 8.4.8 (p) Biodegradation and effects of an oil spill on active microbial communities from a mediterranean hypersaline lake

Yannick Corsellis<sup>1</sup>, Marc Krasovec<sup>2</sup>, Léa Sylvi<sup>1</sup>, Philippe Cuny<sup>1</sup>,  
 Cécile Militon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>MIO, Marseille

<sup>2</sup>Observatoire océanologique de Banyuls

Among organic contaminants, petroleum derivatives are certainly the most widespread on Earth because of their economic and energetic interests. Since many years, processes of hydrocarbons bioremediation in marine environments characterized by mild salinities (close to 35 g/l) have been extensively studied. Unlikely, few studies focusing on fate and impact of oil hydrocarbons have been undertaken in hypersaline environments (salinities higher than 3,5% NaCl) so far. Indeed, it was previously considered that high salinities were a major constraint for hydrocarbon biodegradation (Ward et Brock, 1978 ; Oren, 1992). Recently, however, the isolation of hydrocarbon-degrading microorganisms (Al-Mueni and al., 2007 ; Tapilatu and al., 2010 ; McGenity, 2010) from

hypersaline environments demonstrated that hydrocarbon biodegradation was possible even at high salinities. In this study, the effects of an oil contamination on the bacterial and archaeal communities of a Mediterranean hypersaline lake was monitored by DGGE fingerprinting. Marked changes were observed for archaeal and bacterial communities but only after 30 days of incubation. Biodegradation (about 13% after 30 days of incubation at 40°C) of oil was only observed when an additional source of organic carbon was supplemented. Biodegradation potential was confirmed by the isolations of hydrocarbonoclastic bacteria and archaea.

References

Ward, D.M., and Brock, T.D. 1978. Hydrocarbon biodegradation in hypersaline environments. *Appl. Environ. Microbiol.* 35(2) : 353-359.  
 Oren A, Gurevich P, Azachi M, Hents Y (1992) Microbial degradation of pollutants at high salt concentrations. *Biodegradation* 3 : 387-398.  
 Al-Mueini R, Al-Dalali M, Al-Amri IS, Patzelt H (2007) Hydrocarbon degradation at high salinity by a novel extremely halophilic actinomycete. *Environ. Chem.* 4 : 5-7.  
 Tapilatu YH, Grossi V, Acquaviva M, Militon C, Bertrand J-C, Cuny P (2010) Isolation of hydrocarbon-degrading extremely halophilic archaea from an uncontaminated hypersaline pond (Camarque, France). *Extremophiles* 14 : 225-231.  
 McGenity,T.J.(2010). Halophilic hydrocarbon-degraders. In : *Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*, Ed K.N.Timmis (Berlin,Heidelberg : Springer-Verlag), pp. 1939-1948.

#### 8.4.9 (p) Biogobatteries and geophysical sensitivity to microorganisms growth in porous media : new developments

Andre Revil<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Colorado School of Mines, Golden, États-Unis

In the first part of the presentation, I will show how microorganisms can connect electron donors (for instance associated with the degradation of oil) to electron acceptors for instance oxygen through the development of mechanisms allowing the long-range (cm scale) transport of electrons. The resulting electrical field can be measured remotely and be used to analyze the impact of these microorganisms on redox processes. In the second part of the presentation, I will focus on the use of Spectral Induced Polarization (SIP) to remotely determine bacterial activity in porous media during the biodegradation of oil. SIP offers a technique for monitoring a number of porous media processes involving bacteria. Indeed, bacterial cell surfaces possess an electrical double layer and therefore are polarized in an electrical field. We performed SIP measurements (from 0.1 Hz to 1 kHz) on cell suspensions alone and cell suspensions mixed with sand. We used *Zymomonas mobilis* at four different cell densities (including the background). The quadrature conductivity spectra exhibit two peaks, one around 0.05-0.10 Hz and the other around 1-10 Hz. Because SIP measurements are typically reported above 1 Hz, we are the first to report the existence of these two peaks. In the bacterial suspensions in growth medium, the quadrature conductivity at Peak I is linearly proportional to the density of bacteria. For the case of the suspensions mixed with sands, we observed for Peak II a smaller increase of the quadrature conductivity with cell density. A comparison of the experiments with and without sand grains demonstrates the effect of the porous medium on the overall quadrature conductivity response (decrease of the amplitude and shift of the peaks to lower frequencies). Our results indicate that for a given porous medium, time-lapse SIP has potential for monitoring changes in bacterial abundance within the medium.

#### 8.4.10 (p) Dynamique d'une communauté microbienne hydrocarbonoclaste de sédiments intertidaux sous des conditions fluctuantes anoxie/oxie

Fanny Terrisse<sup>1</sup>, Cristiana Cravo-Laureau<sup>1</sup>, Alex Dumbrell<sup>2</sup>, Mathilde Gondard<sup>1</sup>, Claire Gassie<sup>1</sup>, Marisol Goñi-Urriza<sup>1</sup>, Justine Abella<sup>1</sup>, Karine Duboscq<sup>2</sup>, Christine Cagnon<sup>1</sup>, Ronan Jézéquel<sup>3</sup>, Terry McGenity<sup>2</sup>, Robert Duran<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EEM-IPREM, Pau

<sup>2</sup>University of Essex, School of Biological Sciences, Colchester, Royaume-Uni

<sup>3</sup>Cedre, Brest

Les écosystèmes côtiers sont chroniquement impactés par des pollutions aux hydrocarbures pétroliers. De nombreuses études ont mis en évidence le rôle clé des microorganismes dans la dégradation de ces polluants. Toutefois, seules quelques études ont pris en compte les conditions environnementales qui fluctuent au rythme des marées et de l'activité de la macrofaune. Cependant les conditions rédox fluctuantes constituent un paramètre important régissant l'organisation des communautés microbiennes et par conséquent la biodégradation des hydrocarbures.

Afin d'appréhender le devenir du pétrole dans ces écosystèmes, il est donc indispensable d'apporter des connaissances sur l'écologie des microorganismes intervenant dans son élimination, notamment dans des conditions rédox fluctuantes. Ainsi, une communauté microbienne hydrocarbonoclaste de sédiments intertidaux a été exposée à des oscillations anoxie/oxie en présence de pétrole lors d'une expérience en bioréacteurs. Les réponses écologiques de la communauté en conditions oscillantes (15 jours d'incubation dans des conditions anoxiques avec deux périodes d'aération de 1 jour, aux 7<sup>ème</sup> et 10<sup>ème</sup> jours d'incubation) ont été suivies et comparées avec celles obtenues en conditions d'oxie ou d'anoxie permanentes. La capacité de biodégradation des hydrocarbures a été mise en évidence en conditions d'oscillations et d'oxie permanente avec des cinétiques de dégradation différentes. De plus, les oscillations ont stimulé la communauté bactérienne. La caractérisation approfondie de cette communauté (NGS) a été l'occasion de décrire la dynamique bactérienne sous les conditions redox fluctuantes. Environ 32% des OTUs obtenus correspondants à des bactéries métaboliquement actives ont été détectés dans les trois conditions (équivalent à 74% de la totalité des séquences obtenues). Ces résultats montrent le potentiel de nombreux microorganismes de cet environnement à tolérer et/ou s'adapter aux différentes conditions d'oxygénation.

## 8.5 Biogéochimie du mercure

### (Advances in mercury biogeochemistry)

**Responsables :**

- Jeroen Sonke (GET, Toulouse)  
jeroen.sonke@get.obs-mip.fr
- David Amouroux (LCABIE-IPREM, Pau)  
david.amouroux@univ-pau.fr

**Abstract :**

Half a century of mercury research has provided scientists and policy makers with detailed understanding of mercury toxicology, biogeochemical cycling and past and future impacts on human exposure. The complexity of the global biogeochemical mercury cycle has led to repeated and ongoing paradigm shifts in numerous mercury related disciplines and outstanding questions remain. In this session we invite contributions that target those outstanding questions on the biogeochemical cycling of mercury.

### 8.5.1 Keynote communication : Mercury in the Ocean

Lars-Eric Heimbürger<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universität Bremen, Bremen, Allemagne

I will review and synthesize the current understanding of the marine biogeochemical cycle of mercury and how its natural cycling may have been altered by anthropogenic emissions and climate change. My presentation will focus on potential sources of methylmercury to the marine food web, which is of most concern to mankind. The temporal and spatial variability of many Hg sources to the ocean is still ill-constrained. At the same time only little is known about the biogeochemical mechanism producing methylmercury. A few examples of studies investigating Hg species distribution in the open ocean will be given to illustrate the knowns and unknowns. In my talk I will examine the impact of the temporal variation of anthropogenic Hg emissions and warming climate on marine methylmercury production. I will also share my ideas of future research needs and potential approaches to furthering our understanding of methylated Hg cycling in the ocean.

### 8.5.2 (o) Distribution and sources of methylmercury (MeHg) in high altitude lakes ecosystems : The Lake Titicaca case study

Pascale Baya<sup>1</sup>, David Point<sup>1</sup>, Stéphane Guédron<sup>2</sup>, Xavier Lazzaro<sup>3</sup>,  
 David Amouroux<sup>4</sup>, Laurent Chauvaud<sup>4</sup>, Erwan Amice<sup>5</sup>, Julien  
 Thébaud<sup>5</sup>, Thierry Le Bec<sup>5</sup>, Dario Acha<sup>6</sup>

<sup>1</sup>GET/IRD, Toulouse

<sup>2</sup>ISTerre/IRD, Grenoble

<sup>3</sup>BOREA/IRD, Paris

<sup>4</sup>LCABIE-IPREM, Pau

<sup>5</sup>IUEM, Plouzané

<sup>6</sup>UMSA/LCA, Campus Cota Cota, La Paz, Bolivia

Methylmercury (MeHg) is a potent neurotoxin which is readily assimilated by organisms and bioaccumulates along aquatic foodwebs. The key factor determining the concentration of Hg in biota is thus the concentration of MeHg in water. However, our understanding of the sources and transformation mechanisms of MeHg in the aquatic environment is still incomplete. Lake Titicaca is a large (8559 km<sup>2</sup>), unique high altitude (3810 m) productive tropical lake, which receives mercury (Hg) mainly from tributary rivers inputs and atmospheric deposition. The aim of this study was to investigate the processes that control the production and spatial distribution of MeHg in Titicaca Lake. Lake water samples were collected at different locations and depths in the water column and at the sediment-water interface in April 2014 (end of the wet season). MeHg concentrations increased with depth (from 41 ± 10.8 pgL<sup>-1</sup> at the surface to 275 ± 7 pgL<sup>-1</sup> at the bottom) suggesting either net MeHg production at deeper depths (> 25m) or influx of MeHg from the sediment surface. MeHg concentrations in subsurface (2.5 m) water showed a clear diurnal pattern with maximum concentrations following sunrise (62 ± 2.9 pgL<sup>-1</sup>) and minimum concentrations (24 ± 0.6 pgL<sup>-1</sup>) during maximum solar radiation. These results suggest that light related mechanisms, such as photoreduction, might be a significant factor controlling MeHg concentrations in surface and subsurface water. MeHg behaviour at the sediment-water interface was also investigated using in situ benthic chambers to assess the influence of benthic biofilm and macrophytes present at the sediment surface on MeHg production and fluxes.

### 8.5.3 (o) Impact of anaerobic bacterial activities on the dynamic and speciation of mercury in tropical soils in French Guiana

Mira Toubassy<sup>1</sup>, Vanessa Alphonse<sup>1</sup>, Noureddine Bousserrhine<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IEES, Créteil

Mercury (Hg) is one of the most toxic heavy metals due to the high reactivity of its compounds with the surrounding environment. Therefore, dynamic of Hg and its speciation represent a major environmental and health preoccupation. French Guyanese soils (South America) contain high concentrations of Hg due to biogeochemical background, and anthropic activities, especially gold-mining. In dominant tropical oxisols poor in organic matter, Hg has accumulated in association with iron oxyhydroxides. These could affect probably the dynamic of Hg and its speciation by bacterial activity. According to the literature, sulfate-reducing bacteria (SRB) and recently, iron-reducing bacteria (IRB) have been demonstrated to have the capacity to methylate Hg. The purpose of this study is to determine, for the first time, the impact of bacterial activity under anaerobic conditions on the dynamic and speciation of Hg (in particular its methylation) in soils, especially tropical soils. Moreover it aimed to describe the relationship between different anaerobic metabolisms and Hg methylation.

To reach our goals, we have created anaerobic conditions by setting up different types of microcosms studied during one month. Two types of soils have been compared : oxisol on the upslope and gleysol, in the lowland. Different carbon sources were respectively added to the microcosms in order to promote different metabolisms (fermentation or anaerobic respiration). Moreover, inhibitors or stimulators of SRB or IRB were added respectively to microcosms.

Our first results with oxisol showed that the highest global bacterial activity and reduction of iron were found in microcosms containing a fermentable source of carbon (glucose). Although, monomethylmercury (MMHg) concentrations in these microcosms were lower than those reported with acetate or lactate (used by anaerobic respiratory bacteria). This Hg methylation activity detected in oxisol shows that the production of MMHg could occur in situ on the upslope under temporary anaerobic conditions.

In order to define the respective impact of different bacterial guilds, or species involved in Hg methylation, these results will be complemented by ongoing analyses : using inhibitors, and a molecular biology method.

### 8.5.4 (o) Mercury speciation and isotopic composition in zebra fish during ecotoxicological investigations

Caiyan Feng<sup>1</sup>, Zoyne Pedrero Zaya<sup>1</sup>, Patrice Gonzalez<sup>2</sup>, Sophie Gentes<sup>2</sup>, Julien Barre<sup>1</sup>, Marina Renedo Elizalde<sup>1</sup>, Sylvain Bérail<sup>1</sup>, Emmanuel Tessier<sup>1</sup>, Régine Maury-Brachet<sup>2</sup>, Alexia Legeay<sup>2</sup>, David Amouroux<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LCABIE-IPREM, Pau

<sup>2</sup>EPOC, Station Marine d'Arcachon

Methylmercury (MeHg), a highly toxic species, can be accumulated and biomagnified in fish. Its mechanisms of accumulation and transformation in fish remain unknown. In order to understand the differences on IHg and MeHg metabolic processes, zebra fish as a model were exposed to IHg and MeHg enriched diet. Muscle, liver and brain were collected after 0, 7, 25 and 62 days of exposure. Total Hg, its species distribution and the isotopic composition were determined.

Hg concentration in all organs increases with the incubation time, being much higher under MeHg exposure (approx. 10 times than it in IHg condition). Hg speciation analyses carried out by GC-ICP-MS shows

noticeable differences depending on the diet. In general, MeHg was the main species (higher than 90%) in all the organs exhibiting the highest concentration in brain. In contrast, when exposed to IHg, liver was identified as the target organ. Under this condition, IHg was the major species in liver and brain.

Hg isotopic pattern (CVG-MC-ICPMS) depending on the exposure conditions, IHg and MeHg, were also different. In general terms, there is a rapid re-equilibration of the Hg isotopic composition in the organs to the new MeHg-food source without fractionation during dietary uptake. However, a kinetic MDF was observed under the IHg-diet condition. MDF variations (lightest value at 7 days) observed in liver suggests an initial accumulation in this organ, followed by redistribution to muscle and brain. The enrichment of feces in lighter Hg isotopes suggests an efficient excretion mechanism.

The results of the present work confirm the potential of the combination of speciation and isotopic analyses as a powerful tool to investigate Hg metabolic processes.

### 8.5.5 (o) Cycle atmosphérique du mercure dans les régions antarctiques et sub-antarctiques - Programme GMOS

Helène Angot<sup>1</sup>, Olivier Magand<sup>1</sup>, Manuel Barret<sup>1</sup>, Michel Ramonet<sup>2</sup>, Aurelien Dommergue<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LGGE, Grenoble

<sup>2</sup>LSCE, Gif-Sur-Yvette

Scarcity of mercury species records in the Southern Hemisphere is critical to develop appropriate modeling and regulation scenarios. Under the framework of the "Global Mercury Observation System" (GMOS) project, monitoring stations have been set up on Amsterdam Island (37°48'S, 77°34'E) in the remote southern Indian Ocean and in Antarctica. For the first time in the Southern Hemisphere, a 2-year record of gaseous elemental mercury (GEM), reactive gaseous mercury (RGM) and particle-bound mercury (PBM) is presented. GEM concentrations were remarkably steady ( $1.03 \pm 0.08$  ng/m<sup>3</sup>) while RGM and PBM concentrations were very low and exhibited a strong variability ( $0.34 \pm 0.26$  pg/m<sup>3</sup> and  $0.67 \pm 0.84$  pg/m<sup>3</sup>, respectively). Despite the remoteness of the island, wind sector analysis, air mass back trajectories and the observation of radonic storms highlighted a long-range contribution from the southern African continent to the GEM and PBM budgets in winter during the biomass burning season. Lowest concentrations of GEM were associated with southerly polar and marine air masses from the remote southern Indian Ocean. This unique dataset provides new baseline GEM concentrations in the Southern Hemisphere mid-latitudes for further modeling studies, while mercury speciation along with upcoming wet deposition data will help improving our understanding of mercury cycle in the marine boundary layer.

### 8.5.6 (o) Détermination du mercure dans cent seize matériaux de référence géologiques et environnementaux avec un analyseur direct de mercure

Barbara Marie<sup>1</sup>, Luc Marin<sup>1</sup>, Pierre-Yves Martin<sup>1</sup>, Tioga Gulon<sup>2</sup>, Jean Carignan<sup>3</sup>, Christophe Cloquet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

<sup>2</sup>Structure et Réactivité des Systèmes Moléculaires Complexes, Nancy

<sup>3</sup>Centre d'études nordiques, Université Laval, Canada

La concentration en mercure a été déterminée dans 116 matériaux de référence (RMs) géologiques et environnementaux issus de 10 organisations internationales. Notre étude porte sur la variabilité intra et

inter lots de matériaux de référence dont les concentrations en mercure varient de 1 à 6300 ng g<sup>-1</sup>. Les mesures ont été effectuées avec un analyseur direct de mercure. La justesse des résultats a été démontrée par comparaison aux valeurs certifiées et la fidélité par la réalisation de réplicats d'analyse. Une faible variabilité au sein d'un même lot a été établie pour l'ensemble des RMs, apparemment dépendante de la concentration en Hg et de l'homogénéité des échantillons - l'écart-type relatif varie de 0.1 à 23% (n = 3 à 5) - alors qu'une dispersion importante a été constatée pour nombreux d'entre eux entre les bouteilles. L'analyse de lots distincts a permis la mise en évidence de l'homogénéité ou de l'hétérogénéité de plusieurs RMs et nous recommandons donc l'utilisation des standards adéquates pour les contrôle qualité lors de l'analyse du Hg.

### 8.5.7 (p) Mercury distribution, speciation and isotopic signature in sediments and biota from Sagua la Grande River and offshore mangrove keys (Cuba)

Cayian Feng<sup>1</sup>, Lazaro Lima<sup>2</sup>, Susana Olivares<sup>1</sup>, Daniel De La Rosa<sup>2</sup>, Sylvain Bérail<sup>1</sup>, Emmanuel Tessier<sup>1</sup>, Mathilde Monperrus<sup>1</sup>, Zoïne Pedrero Zayas<sup>1</sup>, David Amouroux<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LCABIE-IPREM, Pau

<sup>2</sup>Laboratorio de Análisis Ambiental, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, La Habana, Cuba

Chlor-alkali plants (CAP) which use mercury (Hg) in electrolytic cell manufacture are recognized sources of Hg pollution. In aquatic ecosystems the released inorganic mercury (IHg) can be easily transformed in methylmercury (MeHg) due to microbial activity, followed by bioaccumulation and biomagnification on the trophic chain.

The main aim of this work is the identification and tracking of Hg pollution sources by the investigation of total Hg distribution, its speciation (GC-ICP-MS) and its isotopic signature (CVG-MC-ICP-MS) in sediments and biota (fish and oyster tissues). The study area is Sagua la Grande River, Cuba, which receive the wastewater discharge of a chlor-alkali plant where Hg is used on the manufacturing process since the 1980s. Several sampling points on the mentioned river, as well as on the coastal zone were investigated. Biota samples from Mampostón Dam, Cuba, were used as a background control.

Hg concentration in sediments on the different sampling points reveals wide variations, showing a decrease toward the coastal zone. Regarding biota, Hg concentration in fish from Sagua la Grande River is 10 and 2 times higher than fish from Mampostón Dam (control site) and oysters from the coastal zone, respectively, suggesting that the CAP facility is impacting river and coastal water quality conditions. The advantages of Hg isotopic analyses are exploited in this work to obtain information about both, pollution tracing and (bio) transformations steps. MDF on fish samples from SG River decreases with the MIF increasing in sediments, probably due to Hg (bio)methylation and higher proportion of methyl-Hg. On the other hand, the increase of MIF values from sediments to oyster in the coastal Zone, could be attributed to higher proportion of photo-reduced Hg coming from coastal waters.

The combination of speciation and isotopic approaches contributes to the understanding of the fate of Hg in aquatic ecosystems, as illustrated in the present work.

### 8.5.8 (p) Etude expérimentale de la mobilisation du mercure par des champignons issus de sols tropicaux guyanais

Clarisse Bolou Bi<sup>1</sup>, Nouredine Bousserhine<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IEES, Créteil

Le Mercure (Hg) est un polluant et un neurotoxique qui présente des impacts significatifs sur la santé humaine. Les sols de Guyane Française ont une teneur relativement élevée en Hg qui est d'origine à la fois naturelle (fond géochimique en Hg élevé) et anthropique (activité d'orpaillage). Ces sols constituent donc un réacteur important où le Hg se transforme en différentes formes chimiques potentiellement toxiques qui vont ensuite se trouver plus ou moins disponibles et mobiles dans les sols, les eaux et l'atmosphère. La distribution spatiale du Hg dans les sols est liée non seulement à la quantité et qualité de la matière organique ainsi que des (oxyhydr)oxydes de fer et d'aluminium mais aussi à l'activité biologique dans ces sols. A l'heure actuelle, les activités bactériennes sur les transformations du Hg dans les sols sont relativement bien contraintes. En revanche, très peu d'études ont été réalisées sur l'impact des champignons, et plus spécifiquement, des champignons mycorhiziens sur la biodisponibilité et la mobilité du Hg dans les sols. Pourtant, de nombreuses études ont montré que l'inoculation de champignons, alors en symbiose avec les plantes, affecte l'accumulation de certains métaux traces comme le cuivre et le cadmium et permet l'augmentation de la tolérance de ses plantes hôtes à ces métaux.

L'objectif de cette étude est d'isoler et identifier les champignons présents dans ces sols, tester la tolérance de ces champignons vis à vis de différentes concentrations en Hg et enfin quantifier l'impact de ces champignons sur la biodisponibilité et la mobilité du Hg dans les sols en réalisant des expériences de lixiviation du Hg à partir du cinabre (forme la plus stable de Hg).

Les premiers résultats montrent que les champignons permettent la mobilisation du Hg en solution à partir du cinabre ainsi qu'une grande capacité d'absorption du Hg par les champignons. Les mécanismes mis en jeu lors de cette mobilisation restent encore à définir.

### 8.5.9 (p) Mercury speciation and total isotopic composition in rice in the vicinity of the Wanshan mercury mining area, China

Caiyan Feng<sup>1</sup>, Zoyné Pedrero Zayas<sup>2</sup>, Ping Li<sup>1</sup>, Xinbin Feng<sup>2</sup>, Buyun Du<sup>2</sup>, Julien Barre<sup>1</sup>, Sylvain Bérai<sup>1</sup>, Emmanuel Tessier<sup>1</sup>, Mathilde Monperrus<sup>1</sup>, David Amouroux<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LCABIE-IPREM, Pau

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guizhou, Chine

Methylmercury (MeHg) as a pollutant can threaten the human beings and wild life after its bioaccumulation and biomagnifications. Rice coming from Wanshan, mercury mining area (Guizhou Province, China) has been reported as an important MeHg source for the local people compared to fish consumption. MeHg concentration in rice seeds can reach up to 27.6 µg/kg at that area.

In this work mercury (Hg) isotopic composition and its speciation were investigated in 14 rice seed samples from different paddy locations of Wanshan. Sample treatments for both isotopic and speciation were identified as a critical step on the analytical strategy on the rice matrix. Different Hg species extraction methods (enzymatic, microwave based methods) were tested before the speciation analyses by GC-ICP-MS. Species specific isotope dilution (SSID) quantification was used to estimate the transformation factors (i.e. methylation and demethylation) during sample preparation. Hg isotopic composition was determined by CVG-MC-ICP-MS after optimization of the sample treatment.

Total mercury concentration in rice samples vary from 87 to 579 ng/g and a large variation of MeHg percentage is also observed (from 10 to 90%). Depending on the sampling site, mass dependent isotopic composition of mercury exhibit variation up to 4.0 ‰ in δ<sup>202</sup>Hg, while mass independent isotopic fractionation, as Δ<sup>199</sup>Hg remains constant

(close to 0). The δ<sup>202</sup>Hg isotopic composition increase (heavier Hg isotope) with the percentage of MeHg suggesting a better uptake and transport of MeHg from soil to the rice seed than for inorganic Hg, probably due to a larger retention of the last one in the soil matrix and in the rice plant (i.e. phytochelatins).

The obtained results illustrates that the applications of isotopic fractionation tools are not only limited to geochemical studies, but successfully extended on the investigation of metabolic processes and food analyses, especially when combined with speciation in biota.

### 8.5.10 (p) Iron and sulfur biogeochemical processes involved in mercury mobility and speciation in an artificial aquifer

Jennifer Hellal<sup>1</sup>, Lucie Huguet<sup>2</sup>, Stéphane Guédron<sup>3</sup>, Jörg Schäfer<sup>4</sup>, Valérie Laperche<sup>4</sup>, Catherine Joulain<sup>1</sup>, Laurent Lancelleur<sup>5</sup>, André Burnol<sup>1</sup>, Jean-Philippe Ghestem<sup>1</sup>, Francis Garrido<sup>1</sup>, Fabienne Battaglia-Brunet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>Institut F.-A. Forel, University of Geneva, Versoix, Suisse

<sup>3</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>4</sup>EPOC, Pessac

<sup>5</sup>Université de Pau et des Pays de l'Adour

Although many data are available on the Hg cycle in terrestrial surface aquatic environments, little is known on its behaviour in subsurface and deep aquifers where environmental conditions (anoxia, water saturation) may be favourable to Hg methylation. Bioavailability of Hg, a prerequisite for its methylation by sulphate or iron reducing bacteria, is mainly controlled by physico-chemical conditions and the strong affinity of Hg for organic matter or iron (oxy)hydroxides.

This work presents an original experimental setup combining geochemical and microbiological approaches in order to imitate reactions observed in aquifers (i.e., Hg biosorption, solubilisation versus sequestration, speciation, dual effect of iron and sulphate). Two columns were filled in the lower half with sterile sand and in the upper half with a sterile mixture of sand and iron oxides, initially enriched with Hg(II). The water flow was ascendant. Five septa set regularly along the columns enabled water sampling from the different layers of the column without perturbing water flow or in-situ experimental conditions. After an abiotic rinsing period, the system was inoculated with a bacterial consortium and physico-chemical and microbial parameters were monitored in time and space. The inflowing groundwater was supplemented with sulphate and lactate to encourage sulphate-reducing bacteria in the first column (A) and with molybdate to inhibit sulphate reduction and glucose (10 g.L<sup>-1</sup>) to favour iron-reducing bacteria in the second column (B). At the end of the experiment (130 days), microbial methylation potentials were evaluated using stable isotope-spiked incubations, diversity using Denaturing Gel Gradient Electrophoresis (DGGE) followed by band sequencing and Fluorescent in situ hybridisation (FISH). Raman spectroscopy was carried out to identify neo-mineral formation and selective extractions provided information on Hg distribution between the solid carrier phases.

### 8.5.11 (p) Temporal evolution of mercury and its speciation in the Loire river over the last 30 years

Joel Knoery<sup>1</sup>, Christophe Brach-Papa<sup>1</sup>, Bastien Thomas<sup>1</sup>, Dominique Auger<sup>1</sup>, Tiphaine Chouvelon<sup>1</sup>, Sylvette Crochet<sup>1</sup>, Emmanuelle Rozuel<sup>1</sup>, Jane Sanjuan<sup>1</sup>, Jean-François Chiffolleau<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Biogéochimie des Contaminants Métalliques, Nantes

The four Camelia cruises (2012-2015) on the macrotidal Loire estuary characterize the distribution and speciation of trace-metals and mercury under contrasted river flow conditions and tidal amplitudes. Over the last 30 years, considerable changes occurred in the drainage basin and impacting this sensitive mixing zone between marine and fresh water : urbanization, farming practices, industrial activity, environmental regulation, etc... In the same time span, the available water-column mercury data became more reliable. This presentation shows the latest mercury data and integrates them in the historical perspective of the temporal evolution of mercury levels and riverine fluxes to the Bay of Biscay.

Early 1980's estuarine transects show total dissolved Hg levels near 25pM (Figueres et al., 1985). A subsequent and detailed study 10 years later shows estuarine levels between 1 and 6pM (Coquery, 1994). Twenty years after this pioneering work, available results from Camelia cruises confirm the freshwater endmember levels are lower (1,5 to 3,5pM). During mixing of the saltwater and freshwater endmembers, concentrations decrease through the turbidity maximum, and level off at the stable oceanic endmember concentrations (0,5pM). Influence of freshwater flow regime is important. In 2013-14, dissolved methyl mercury (MeHg) is only detectable (e.g., >0,1pM) in the freshwater end-member. An ongoing biweekly to monthly monitoring of mercury levels and speciation at Montjean and immediately downstream of Nantes begun in 2014 shows that mercury levels and speciation fluctuate with water flow and the extent of flooded area upstream.

The presentation will show the both the present state and the temporal evolution of mercury and its speciation in the Loire estuary over the last 20 years.

### 8.5.12 (p) Determination of femtomolar levels of methylmercury in sea-water by isotopic dilution gas chromatography sector field inductively coupled plasma mass spectrometry

Christelle Lagane<sup>1</sup>, Lars-Eric Heimbürger<sup>1</sup>, David Point<sup>1</sup>,  
 Laure Laffont<sup>1</sup>, Jérémy Masbou<sup>1</sup>, Frédéric Candaudap<sup>1</sup>, Daniel  
 Cossa<sup>2</sup>, Bastien Thomas<sup>2</sup>, Joël Knoery<sup>2</sup>, Jeroen Sonke<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Laboratoire Biogéochimie des contaminants métalliques, Nantes

Monomethylmercury (MMHg) accumulates to harmful levels along the marine food chain. Determinations of MMHg in sea-water are still scarce mainly due to analytical limitations that did not allow detecting ultratrace concentration levels, in the femtomolar range. Three techniques are used today to measure MMHg in sea-water and of which all imply a derivatization step : cryofocussing hydrate generation, ethylation and propylation. Determination of MMHg in sea-water by species-specific isotope dilution, derivatization by propylation, and detection via gas chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry (ID-GC-ICP-MS) was shown to be most promising. We improved the performance of this method by optimizing the coupling between a gas chromatograph and a high resolution sector field inductively coupled plasma mass spectrometry (Element XR). Participation on recent international intercalibration exercises confirmed the performance of this method in terms of detection limits, accuracy and precision. We applied this method to samples from the recent Polarstern cruise ARK XVI/3 TranArk to the central Arctic Ocean (09/2011). A vertical profile was measured in parallel at the GET laboratory via ID-GC-SF-ICP-MS and at the IFREMER laboratory in Nantes via cryofocussing hydrate generation and detection via AFS atomic fluorescence spectroscopy. We will discuss the results of this comparison as well as precision, detection limit and blank levels.

## 8.6 Les isotopes stables non-traditionnels comme traceurs biogéochimiques (SFIS)

### (Non-traditional stable isotopes as biogeochemical tracers) (SFIS)

#### Responsables :

- Oleg Pokrovsky (GET, Toulouse)  
oleg.pokrovsky@get.obs-mip.fr
- Franck Poitrasson (GET, Toulouse)  
franck.poitrasson@get.obs-mip.fr
- Christophe Cloquet (CRPG, Nancy)  
cloquet@crpg.cnrs-nancy.fr

#### Abstract :

In the past fifteen years, a new instrumentation has opened the door to the analysis of stable isotopes of light elements such as non-traditional Li, Mg or Ca, but also and mainly transition elements such as Fe, Cu, Zn or other heavier elements. Biogeochemical processes are responsible for some of the most important isotopic composition variations among those identified so far for these elements. The ability to unravel processes controlling the mobility, bioavailability and biogeochemical cycling of essential and potentially toxic elements in the terrestrial environment has become a hot scientific topic. This session is an opportunity to make an updated inventory on the use of the isotopic composition of these elements and to show the latest developments, especially in the biogeochemical field.

#### Résumé :

Depuis une quinzaine d'années, une nouvelle instrumentation a ouvert la porte à l'analyse des isotopes stables d'éléments légers non traditionnels comme le Li, le Mg ou le Ca mais aussi et principalement des éléments de transition comme le Fe, le Cu, le Zn ou d'autres éléments plus lourds. Les processus biogéochimiques sont à l'origine de variation de la composition isotopique parmi les plus importantes recensées sur la plupart de ces éléments. La possibilité d'accéder à la compréhension de processus contrôlant la mobilité, la biodisponibilité et le cycle biogéochimique des éléments essentiels et des éléments potentiellement toxiques dans l'environnement terrestre est devenue un thème scientifique de première importance. Cette session est l'occasion de faire un état des lieux de l'utilisation de la composition isotopique de ces éléments et de montrer l'avancement des développements particulièrement dans le domaine biogéochimique.

### 8.6.1 (o) Nickel isotopes : a possible biomarker of early life ?

Ghyslaine Quitte<sup>1</sup>, Philippe Oger<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IRAP, Toulouse

<sup>2</sup>Laboratoire de Géologie de Lyon : Terre, Planètes, Environnement

Transition metals such as iron, zinc, copper and nickel (Ni) play a major role in the metabolism of living organisms. It seems therefore possible to use these chemical elements as biomarkers, in particular for the early Earth when fossils were inexistent. Two types of prokaryotes may have been present at that time : methanogenic archaea and phototrophic cyanobacteria. Nickel is potentially a good marker for methanogens as it is directly involved in methanogenesis (the F430 coenzyme, a tetrapyrrole with a Ni atom, is involved in the last step of methanogenesis as a component of the enzymatic methyl reductase complex) and, unlike iron, is not significantly affected by redox reactions. Photosynthetic cyanobacteria associated with stromatolites also use Ni. As living organisms can fractionate isotopes when they incorporate chemical elements, Ni isotopes could potentially constrain the biological activity on the early Earth.

The aim of the present study was to (1) develop a new biomarker, particularly well suited to methanogenesis and resistant to metasomatism and redox processes ; (2) study the preservation of the isotopic signal in rocks, and (3) look for traces of early life in archean samples - and identify the type of micro-organisms present at that time.

Following the pioneering work of Cameron et al. (2009), we performed cultures of *M. jannaschii*, a methanogenic archaeon, under varied pH and temperature conditions to establish the influence of these parameters on the isotope fractionation of Ni, if any. Mass balance calculations show that this archaeon significantly assimilates Ni. Modifying the procedure of Cameron et al. (2009), we were able to get rid of the carbonate or sulfide precipitate that appears during the culture and potentially disturbs the isotopic mass balance. Both cells and residual media were analyzed for their isotope composition : the cells are depleted in heavy Ni isotopes relative to the starting- and to the residual culture medium by more than 0.8‰. Effects apparently do not depend on the temperature, while pH is a more important parameter. We are currently trying to extend these observations to other microorganisms and geological samples.

Cameron et al. (2009) PNAS 106, 10944-10948.

### 8.6.2 (o) Iron isotope fractionation during Fe(II) and Fe(III) adsorption on cyanobacteria

Daniel Santos Mulholland<sup>1,2</sup>, Franck Poitrasson<sup>1,2</sup>, Liudmila Shirokova<sup>1,3</sup>, Aridane Gonzalez<sup>1</sup>, Oleg Pokrovsky<sup>1,4</sup>, Geraldo Boaventura<sup>2</sup>, Lucieth Vieira<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brésil

<sup>3</sup>Laboratory of Aquatic Ecosystems, Institute of Ecological Problems of the North, Russian Academy of Science, Arkhangelsk, Russia - Russie

<sup>4</sup>BIO-GEO-CLIM Laboratory, Tomsk State University, Tomsk, Russia - Russie

The present study aimed at testing the hypothesis that, similarly to other metal cations, Fe adsorption on bacterial phytoplankton likely cause significant isotopic fractionation with preferential adsorption of heavy isotopes on the cell surface. We measured the isotopic fractionation during the interaction of aqueous Fe with planktonic cyanobacteria (*Gloeocapsa* sp., *Synechococcus* sp., and *Planthothrix* sp) in six independent experiments using two distinct Fe oxidation states (Fe(III) and Fe(II)) at pHs of 3 and 6. Isotopic analyses demonstrated that the Fe

adsorption on bacterial planktonic biomass yields a clear enrichment of heavy isotopes on the cell surfaces, producing isotopically light  $\delta^{57}\text{Fe}$  values in final solutions. The adsorption experiments with Fe(II) in the initial solution yielded a  $\delta^{57}\text{Fe}_{\text{cell-solution}}$  ranging from 2.4 to 2.9‰, whereas the adsorption experiments with Fe(III) in the initial solution yielded  $\delta^{57}\text{Fe}_{\text{cell-solution}}$  ranging from 0.92 to 1.03‰. Because these data plot close to closed system equilibrium isotopic fractionation lines rather than Rayleigh curves, the most likely mechanism can be defined as a steady state isotopic fractionation, linked with short-termed reversible Fe adsorption on cells. The preferential enrichment of heavy Fe isotopes on the cell surfaces is attributed to the stronger covalent metal-ligand bonding (Fe-O-C/P) present in the Fe octahedrally coordinated with phosphoryl or carboxyl groups on the cell walls when compared with the Fe aquacomplexes (O-Fe-O) in solution. These findings suggest that Fe adsorption on cyanobacteria cell surfaces might have profound implication on Fe isotopic fractionation in continental river and lacustrine waters and oceans during phytoplankton blooms in the course of the Earth's life evolution.

### 8.6.3 (o) Fractionnement isotopique du Sélénium induit par les microorganismes

Laurent Lancelier<sup>1</sup>, Emmanuel Tessier<sup>1</sup>, Maïté Bueno<sup>1</sup>, Sylvain Béraïl<sup>1</sup>, Florence Hakil<sup>2</sup>, Rémy Guyoneaud<sup>2</sup>, David Amouroux<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LCABIE-IPREM, Pau

<sup>2</sup>EEM-IPREM, Pau

Dans le cadre du projet "Arctic Metals" (ANR-11-CESA-0011) et du programme de recherche TAKUVIK (Université Laval-CNRS), des souches bactériennes ont été sélectionnées à partir du milieu naturel (lacs subarctiques et lacs boliviens) pour leur capacité à transformer/réduire le sélénium (Se). Des expérimentations préliminaires comportant une dizaine de souches isolées d'écosystèmes d'altitude en Bolivie (*Desulfovibrio* sp), incubées en anaérobiose et en présence de sélénite ont permis d'optimiser les concentrations d'exposition pour un rendement de production optimal des espèces volatiles séléniées. L'analyse en spéciation (GC-ICPMS) des gaz formés a montré une production d'espèces volatiles séléniées dépendante du type de métabolisme (respiration des sulfates ou des fumarates). Le diméthylséléniure et le diméthylsélénure sont parmi les espèces volatiles majoritairement formées.

Afin de quantifier le fractionnement isotopique du sélénium lié aux transformations biotiques dans le volume de tête, le milieu de culture et les cellules, 2 L de milieu de culture enrichis soit en sulfates, soit en fumarates, ont été amendés avec 0,1 mM de sélénite puis inoculés avec une pré-culture de la souche *Desulfovibrio* P1G7. Les triplicats d'incubations de chaque condition de milieu ont été conservés 15 j à 36°C et à l'abri de la lumière. Le volume de tête a été renouvelé en permanence par un flux d'azote (2 mL/min) et les espèces volatiles séléniées ont été piégées par bullage dans trois pièges acides ( $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}_2$ , 1 : 1) montés en série pour chacun des répliqués.

Avec un rendement de production de sélénium volatil de 1 à 2‰, la signature isotopique du sélénium dans chaque fraction (atmosphère, milieu, cellule) a été mesurée par un couplage génération d'hydrures-MC-ICP-MS. Ces valeurs permettront in fine de discriminer les sources (i.e. pollution minière diffuse vs biotransformation-transport atmosphérique-déposition) dans des environnements soumis à des changements rapides (e.g. fonte du pergélisol subarctique).

### 8.6.4 (o) Physico-chemical characterization of native mosses and Zn stable isotopic fractionation

Aridane G. Gonzalez<sup>1</sup>, Oleg Pokrovsky<sup>1</sup>, Jérôme Viers<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

This study is focused in the role of four native mosses (*Hypnum* sp., *Sphagnum* sp., *P. purum* and *B. rutabulum*) as bioindicator of Zn transfert and deposition via combining physico-chemical characterization of moss surfaces and measuring Zn stable isotopic fractionation during the adsorption process. The acid-base titration of mosses suggested the presence of tentative functional groups such as phosphodiester, carboxyl, phosphoryl, amine, and polyphenols.

The adsorption of Zn as a function of pH yielded the maximal adsorption as 73% at pH = 7.8 for all the species, following and « universal adsorption edge ». The adsorption capacity can be ranked as following : *B. rutabulum* ≥ *Sphagnum* sp. ≥ *Hypnum* sp. ≥ *P. purum*. In addition, the adsorption as a function of Zn concentration demonstrated that the species could be ranked as : *B. rutabulum* ≥ *Sphagnum* sp. ≥ *P. purum* ≥ *Hypnum* sp. The *Sphagnum* sp. showed the maximum number of binding sites (28.6 mmol g<sup>-1</sup>).

Zn is emitted to the atmosphere in greater quantities than other trace metals worldwide. The most common sources of Zn are the industries, traffic and urban incinerations. Therefore, it is necessary to identify and test potential bioindicators for tracing the Zn levels and isotopic composition in urban and industrial areas. In the current investigation, the stable isotopic fractionation of Zn, was measured during adsorption experiments at different pH values (from 3 to 7) in a wide range of aqueous Zn concentration (from ppm to µg ppb levels).

The isotopic offset demonstrated slight enrichment of heavy isotopes on the moss surfaces compared to the aqueous solutions. The range of  $\Delta^{66}\text{Zn}(\text{solid-solution})$  varied from 0.01 to 0.3‰. The  $^{66}\text{Zn}$  enrichment can be understood in view of the change of Zn coordination upon its reaction with organic functional groups identified in the moss surface cells. Zn is coordinated to six water molecules in aqueous solution and it is coordinated to 4 molecules after interaction with organic ligands such as carboxylate, amine and polyphenols.

Therefore, mosses can be used as straightforward tracers of environmental pollution since there is very little modification of the isotopic signature of Zn source during Zn uptake or adsorption on moss bags from the aerosols. This finding should increase the potential use of mosses as bioindicators.

### 8.6.5 (o) Zn sources in the Seine River watershed : information from XAS and isotopic analyses

Caroline Bonnot<sup>1</sup>, Alexandre Gelabert<sup>1</sup>, Guillaume Morin<sup>2</sup>, Pascale Louvat<sup>1</sup>, Olivier Proux<sup>3</sup>, Marc Benedetti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>IMPMC, Paris

<sup>3</sup>Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble

In 2000, the European Union established the Water Framework Directive requiring its members a good ecosystem status of all the water bodies for 2015. One of the aspects addressed by this directive is the anthropogenic impact on metal concentrations in rivers. Since urban and industrial sources yield major anthropogenic inputs to the Seine River, zinc is used as a marker of metal pollution in this watershed. However the origin of the variability of the dissolved and particulate Zn fluxes in the Seine River is still poorly understood.

Zn isotopic measurements provide information on metal sources (natural versus anthropogenic) in the watershed [1]. However, Zn isotopic fingerprint alone will hardly unravel the processes acting in the water column (biogeochemical processes [2,3,4] versus sources mixing). As a result, complementary knowledge of Zn speciation with the help of X-ray absorption spectroscopy (XAS) is needed.

To characterize the watershed's geochemical background, three monolithologic sub-basins with specific soil occupations (urban, agricultural and forest) have been sampled every two months during one year. The contribution of each soil occupation to the global Zn signal and their seasonal variation is thereby determined. Significant Zn isotopic fractionations in suspended particulate matter (SPM) of 0.10‰ between urban and agricultural sub-basins and 0.15‰ between urban and forest sub-basins are observed. Zn speciation in SPM is mainly controlled by three main phases common to the three sites, in addition to minor specific bearing phase for each sub-basin type.

The combined study of Zn isotopic signatures and speciations in SPM applied to these specific sub-basins should permit to better understand the Zn geochemical cycle and the parameters controlling the dynamics of Zn in the Seine River watershed.

### 8.6.6 (o) Zinc and Copper isotope fate in Amazonian mixing zone

Damien Guinoiseau<sup>1</sup>, Alexandre Gelabert<sup>1</sup>, Pascale Louvat<sup>1</sup>, Marc Benedetti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

Metallic trace elements like Zn and Cu are mobilized during weathering at the rock-water interface and transported through soils and rivers. Modification of their speciation and bioavailability are expected in contrasted zones such as river confluences. In the Amazonian basin, mixing between the white mineral waters of Rio Solimões and the black organic waters of Rio Negro is a judicious place to study the processes that control the distribution of Zn and Cu in the water column and between particulate and dissolved phases. Waters were collected in low water period, in each tributary and 80 km downstream the confluence. Five vertical profiles were sampled for each river section. Water velocity variability is observed, mainly in the Amazon River section, with a gradient front between the banks. To accurately determine element fluxes and tributary's impact in the mixing, we developed a box model from ADCP measurements with a weighing of sampling points relative to their velocity. A diffusive gradient is modeled at the boundary of each box.

Zn and Cu concentrations in the water sections appear heterogeneous, with enriched Cu and depleted Zn in the dissolved load of Solimões compared to Rio Negro. Zn and Cu partition coefficients (K<sub>d</sub>) between suspended sediments (SPM) and dissolved phases increase with depth in most profiles. Zn is mainly carried by SPM (clays or Particulate Organic Matter i.e. POM) whereas Cu has a high affinity for dissolved organic matter and its abundance in the Amazon is clearly controlled by the organic matter inputs from the Rio Negro. Exchange processes (sorption/desorption, redox...) during mixing of the two water masses are possibly constrained by Cu and Zn isotope ratio measurements ( $\delta^{66}\text{Zn}$  and  $\delta^{63}\text{Cu}$ ) in SPM. Chemical composition of SPM (POM, oxides and clays) and previous experimental studies [1, 2] predict a shift toward higher  $\delta^{66}\text{Zn}$  in SPM after the confluence, caused by preferential binding of heavier isotopes on solids, and variable along the diffusive mixing water front.

[1] Jouvin et al.. ES&T 43, 5747-5754.

[2] Juillot et al.. GCA 72, 4886-4900.

### 8.6.7 (o) Ni isotopes in an ultramafic environment (Barro Alto, Brazil). deciphering weathering and plant uptake

Gildas Ratié<sup>1,2</sup>, Delphine Jouvin<sup>1</sup>, Jérémie Garnier<sup>2</sup>, Olivier Rouxel<sup>3</sup>, Serge Miska<sup>1</sup>, Edi Mendes Guimarães<sup>2</sup>, Yann Sivry<sup>4</sup>, Emmanuelle Montargès-Pelletier<sup>5</sup>, Isabella Zelano<sup>4</sup>, Cécile Quantin<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Université Paris Sud, Orsay

<sup>2</sup> Universidade de Brasilia, Brésil

<sup>3</sup> Laboratoire Géochimie et Métallogénie, Plouzané

<sup>4</sup> IPG Paris

<sup>5</sup> Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux, Nancy

Although Ni has proven to be significantly fractionated in terrestrial/geological samples<sup>1-2</sup>, leading to an enrichment in <sup>60</sup>Ni of the oceanic ferromanganese crusts, which was broadly consistent with the heavier Ni isotope composition of dissolved Ni in river water (+0.29 to +1.34‰) and seawater (average  $1.44 \pm 0.15\%$ )<sup>3</sup>, no continental environmental studies has been realized yet.

The present study aims to confirm the potential of natural Ni isotopes as a promising tracer for environmental studies from the bedrock to the plants and can help determine the biogeochemical Ni cycling on the Earth, in this case by focusing on the Barro Alto ultramafic complex (Goiás, Brazil). This massif was submitted to an intense lateritic weathering and lateritic profiles are naturally rich in Ni (5446 to 51748 mg/kg).

The average value of the bedrock samples is  $0.28 \pm 0.10\%$ , while values of the saprolitic ore samples, such as in the Ni enrichment zone, are more variable (from -0.61 to 0.30‰), whereas those of the lateritic samples range from 0.00 to 0.13‰. The soil samples are enriched in light Ni isotopes compared to other samples with a range from -0.19 to -0.02‰. Several Ni accumulating plants have been measured (from -0.28 to 1.21‰ depending on the plant). A global trend of depletion of heavier isotopes is observed between the topsoil and the bedrock ( $\Delta^{60}\text{Ni}_{\text{Soil-Bedrock}} = -0.47\%$ ).

The weathering processes, such as formation of Ni-bearing clay minerals and Fe-oxides, appeared to lead to depletion in heavier isotopes, which indicates an export of heavier isotopes in the dissolved phase. The cationic exchange capacity measured on the soil and ore samples shows that the exchangeable part contains a Ni heavy pool ( $\Delta^{60}\text{Ni}_{\text{exch-tot}} = 0.29\%$ ). This result is consistent with the results found by Cameron & Vance (2014), who found a heavy composition of riverine dissolved Ni. The role of the vegetation in the Ni biogeochemical cycling will be discussed.

<sup>1</sup> Gall et al. EPSL, 2013,

<sup>2</sup> Gueguen et al. GGR, 2013, <sup>3</sup> Cameron & Vance, GCA, 2014

### 8.6.8 (o) Altération des basaltes et recyclage biosphérique dans les bassins versants sibériens en contexte de permafrost continu : utilisation des isotopes Sr, Ca, Mg, Zn, Si et Cu

Jerome Viers<sup>1</sup>, Oleg Pokrovsky<sup>1</sup>, Anatoly Prokushkin<sup>2</sup>, Vassili Mavromatis<sup>3</sup>, Marie-Laure Bagard<sup>4</sup>, François Chabaux<sup>5</sup>

<sup>1</sup> GET, Toulouse

<sup>2</sup> Sukachev Institute of Forest, Krasnoïarsk, Russie

<sup>3</sup> Institute of Applied Geosciences, Graz University of Technology, Autriche

<sup>4</sup> Department of Environment, Earth and Ecosystems, The Open University, Royaume-Uni

<sup>5</sup> LHYGES, Université de Strasbourg

La compréhension du cycle des éléments chimiques au sein des zones boréales et subarctiques est d'une importance capitale dans la compréhension des effets du changement climatique sur les flux continent/océan transportés par les rivières. L'altération chimique et les flux d'éléments au sein de la région basaltique de Sibérie Centrale est singulière du fait de la présence de permafrost et de l'extrême saisonnalité

des flux d'eau et de la productivité primaire. A partir d'études précédentes nous avons pu montrer que le transfert des éléments et leurs spéciations (dissous versus colloïdal) est fortement dépendant à la fois de la saison et de la taille du bassin versant. La crue de printemps est marquée par une forte décroissance de la concentration des éléments dits *ni* solubles *z* (Ca, Mg...) tandis que celle des éléments dits *ni* insolubles *z* et du carbone organique augmente fortement. Lors de la période de basses eaux (hiver), les concentrations en éléments solubles augmentent régulièrement au cours du temps. Si les principales caractéristiques hydrochimiques des rivières sibériennes ont été contraintes, la contribution relative des différents réservoirs (roche, sol, matière en suspension des rivières, litière, végétation fraîche) aux flux chimiques dissous demeure très incertaine. Nous présentons ici une synthèse de données isotopiques (Sr, Si, Mg, Ca, Zn, Cu) dans les différents réservoirs de cet écosystème à permafrost continu pour apporter des contraintes sur les sources relatives des matières transportées par les rivières. Les résultats indiquent une importante contribution de la végétation (aiguille de mélèze, mousse...) et nous permettent également de révéler la contribution de roches sédimentaires et carbonatées au sein des grands systèmes fluviaux.

### 8.6.9 (o) Li constraints on geochemical processes in a tropical andesitic watershed, Bras David, Guadeloupe, FWI

Clémentine Clergue<sup>1</sup>, Céline Dessert<sup>1</sup>, Heather Buss<sup>2</sup>, Mathieu Dellinger<sup>1</sup>, Olivier Crispi<sup>1</sup>, Jerome Gaillardet<sup>1</sup>, Marc Benedetti<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IPG, Paris

<sup>2</sup> University of Bristol, Royaume-Uni

We analyze Li concentrations and isotopic compositions in the surface reservoirs (soils, rocks, plants, groundwaters, stream and rain waters) of a small forested andesitic watershed located in the tropical rain forest of Guadeloupe. The aim of this study is to determine a mass budget of Li in this catchment. For this, we identify the origin of Li in the different compartments of this ecosystem and we better constrain the behavior of Li and its isotopes during water-rock interaction using both solution and solid samples.

Solutions include rainfall, groundwater, and stream water collected for the last 3 years. The Li isotope signature ( $\delta^7\text{Li}$ ) is found to vary between 10‰ and 20‰ in rainfall samples. The comparison between these values and the seawater signature (31‰) shows that Saharan crustal dust (-0.7‰) significantly contribute to rainfall signature. We calculate the contribution of the rainfall to the surface water and groundwater Li contents. These results are then used to infer the Li contribution and signature derived from rock-water interaction.

Li concentrations and isotopes are also measured in a 12.5 m-high soil profile and compared to unweathered andesite samples and Montserrat dusts, which both have a  $\delta^7\text{Li}$  signature around 4.5‰. The soil upper section (0 - 400 cm) exhibits a relatively homogeneous Li signature around 3‰, a value that is between atmospheric dusts and andesitic end-members. In the lower section (400 - 1250 cm) the  $\delta^7\text{Li}$  signature decreases from 3.0‰ to -10.5‰. Many studies have shown that during chemical weathering Li isotopes are fractionated as <sup>6</sup>Li is preferentially retained in solid secondary phases whereas dissolved fraction are enriched in <sup>7</sup>Li. In this lower part, the high fractionated Li signature reflects the high weathering degree of this soil profile.

### 8.6.10 (o) L'étude élémentaire et isotopique des sédiments lacustres comme indicateur de perturbations anthropiques à long terme

Christophe Cloquet<sup>1</sup>, Stéphane Aebischer<sup>2</sup>, Reinhard Pienitz<sup>2</sup>, Charles Maurice<sup>3</sup>, Jean Carignan<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

<sup>2</sup>Centre d'études Nordiques, Université Laval, Canada

<sup>3</sup>Ministère des ressources naturelles, bureau de l'exploration géologique, Canada

<sup>4</sup>Takuvik, Université Laval, Canada

Durant les activités minières, le cycle de surface des métaux est perturbé par les changements d'utilisation des terres et l'érosion associée. Le flux de métal dans les systèmes lacustres augmente au cours de l'exploitation minière pour atteindre des facteurs d'enrichissement (FE) significatifs (10 à > 100 fois) par rapport au fond géochimique. Après exploitation, le retour à l'état d'équilibre initial dépend de plusieurs facteurs environnementaux et du bassin versant.

L'étude d'un lac dans la région minière de Schefferville, Québec subarctique, a révélé une augmentation significative des flux de métaux dans les sédiments, associés aux indices d'eutrophisation à l'époque de l'exploitation minière. En période post-mine, les concentrations de métaux dans les sédiments ont diminué, sans jamais atteindre les concentrations du fond géogénique, même plus de 30 ans après la fin de l'exploitation ! Ici, nous avons étudié les sources de métal à l'aide de l'analyse élémentaire et isotopique (Pb, Zn, Fe) des carottes de sédiments de deux lacs. Un lac est situé à proximité de la ville de Schefferville (impact "urbain" plus fort), alors que le second devrait montrer un signal "minier" dus aux dépôts atmosphériques. Nous avons également analysé le minerai et les résidus miniers ainsi que des lichens épiphytes de la région.

Dans les deux lacs, des FE jusqu'à six ont été observés. Ces augmentations sont accompagnées par des variations des isotopes du Pb. Les compositions isotopiques de Fe et de Zn sont différents dans les deux carottes, mais globalement constante au sein d'un lac. Seuls les isotopes de Zn dans un lac semblent affectés par la période d'exploitation. Trois à quatre sources ont été identifiées pour le Fe, le Pb et le Zn (géogénique locale, influence urbaine, influence de l'exploitation minière et le transport longue distance). L'impact de l'exploitation minière sur les lacs de la région de Schefferville est local et limité mais la perturbation se produit rapidement sans retour à l'état initial.

### 8.6.11 (o) Anthropogenic Zn isotopes fractionation : an overview of the Zn-Pb metallurgical industry

Nang Yin<sup>1,2</sup>, Yann Sivry<sup>1</sup>, Piet Lens<sup>1</sup>, Marc Benedetti<sup>1</sup>, Eric Van Hullebusch<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>Laboratoire Géomatériaux et Environnement, Marne-la-Vallée

<sup>3</sup>UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, Pays-Bas

Zn and Pb smelters are the major contributors to Zn and Pb emissions among all anthropogenic sources. Thus, it is essential to understand Zn isotopic variations within the content of metallurgical industries, as well as its isotopic fractionation in environmental media impacted by smelter activities. In this work we review the current state of knowledge on Zn isotopic fractionation during the high-temperature roasting and electrolytic processes in Zn refineries;  $\delta^{66}\text{Zn}$  values variations in air emissions, slags, slags alteration and effluent from the smelters in comparison to geogenic Zn isotopic signature of ores formation and weathering. In order to assess the environmental impact of these smelters, the available and measured  $\delta^{66}\text{Zn}$  values are compiled on smelter impacted natural water bodies (groundwater, stream and river water), sediments (lake and reservoir), soil (peat bog soil, inland soil) and plant uptake. Finally, a special focus is given on the isotopic fractionation induced by numerous physicochemical reactions and transformations, i.e. bio-uptake, surface adsorption, precipitation as well as both inorganic and organic surface complexation. This study provides a framework on

$\delta^{66}\text{Zn}$  variations and fractionation in different environmental compartments (air, water, soil, plants) impacted only by Zn and Pb metallurgical activities (starting from ore mining until final metal products). By compiling the variations, and understanding the processes, Zn isotopes are useful environmental tracers of metallurgical industries.

### 8.6.12 (o) Le mercure en Guyane : traçage isotopique des sources de contamination dans les sédiments du fleuve Oyapock

Sylvaine Goix<sup>1</sup>, Laurence Maurice<sup>1</sup>, Adrien Bosq<sup>1</sup>, Laure Laffont<sup>1</sup>, Jeroen Sonke<sup>1</sup>, Raphaëlle Rinaldo<sup>2</sup>, Alexia Legeay<sup>3</sup>, Régine Maury-Brachet<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Parc National de Guyane, Remire-Montjoly

<sup>3</sup>EPOC, Station Marine d'Arcachon

Le mercure (Hg) est un élément toxique présent dans l'environnement sous deux formes chimiques principales : Hg inorganique et méthylmercure (MeHg). Le MeHg peut être formé par méthylation de Hg(II) dans le système aquatique par voie bactérienne ou abiotique sous certaines conditions. Cette forme chimique de Hg est neurotoxique pour l'être humain. Par conséquent, de nombreuses études scientifiques ont vu le jour depuis le milieu du 20<sup>ème</sup> siècle afin de comprendre le cycle biogéochimique du Hg et d'identifier ses sources d'origines naturelle et anthropique dans l'environnement.

Parmi les chantiers prioritaires figure l'Amazonie. En effet, les populations natives Amérindiennes présentent de fortes concentrations en Hg dans leur organisme. Deux sources principales ont été déterminées : l'orpaillage, artisanal ou non, et l'érosion des sols. Les orpailleurs utilisent du Hg liquide pour amalgamer l'or afin de faciliter son extraction et peuvent rejeter ce Hg dans les sols et les rivières où il va subir diverses transformations physico-chimiques et biologiques pouvant mener à la formation de MeHg. En Guyane française, l'orpaillage illégal est très largement répandu (on estime à environ 70 000 la population d'orpailleurs dans ce département).

Les isotopes stables de Hg ont montré leur efficacité en tant que traceurs de sources, grâce à l'étude du fractionnement dépendant, mais aussi indépendant, de la masse, et sont aujourd'hui largement utilisés. Notre étude (ANR RIMNES) a permis de mettre en évidence un enrichissement significatif des teneurs en Hg total dans les sédiments et la fraction fine associée entre l'amont, non anthropisé, et l'aval du fleuve Oyapock, avec des pics au niveau des criques orpaillées pouvant atteindre 4 fois le fond géochimique naturel. L'étude des fractionnements isotopiques de Hg dans ces mêmes échantillons de sédiments a permis d'identifier plus précisément les sources de Hg et de quantifier la part liée à l'orpaillage dans cet enrichissement.

### 8.6.13 (p) Calcul du fractionnement isotopique du silicium en solution à 300K par des méthodes ab initio : l'importance du désordre configurationnel

Romain Dupuis<sup>1</sup>, Magali Benoît<sup>2</sup>, Merlin Méheut<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Environnement Toulouse, Toulouse

<sup>2</sup>Centre d'élaboration de matériaux et d'études structurales, Toulouse

Le fractionnement des isotopes du silicium lors de la précipitation de cet élément dans les environnements de surface suscite beaucoup d'intérêt dans la littérature récente (1), notamment pour contraindre les processus d'altération et le cycle du CO<sub>2</sub>. Les méthodes ab initio ont montré leur capacité à prédire les fractionnements isotopiques dans

les systèmes impliquant des phases liquides (2). Dans ce travail, nous explorons le fractionnement entre minéral et solution (quartz/H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>, kaolinite/H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>) et entre espèces en solution (H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>/H<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub><sup>-</sup>) des isotopes du Si à l'équilibre thermodynamique. Deux "liquides" contenant 64 molécules d'eau et H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> pour l'un, H<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub><sup>-</sup> pour l'autre, ont été simulés par dynamique moléculaire ab initio à 300K à l'aide du code CPMD. Des "snapshots" indépendants ont été extraits de ces dynamiques, pour en calculer les propriétés de fractionnement suivant les mêmes modalités que développé pour les solides (3). On constate une variabilité significative de ces propriétés de fractionnement entre snapshots (S.D. = 0.4 pourmil, N=10). Cela souligne le rôle du désordre configurationnel, et l'importance de considérer des moyennes statistiques pour les espèces en solution. Les fractionnements calculés à 300K sont de +2.18[0.14]pourmil entre quartz et H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>, +0.42[0.14]pourmil entre kaolinite et H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>, et -1.51[0.16]pourmil entre H<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub><sup>-</sup> et H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>. Le fractionnement positif observé entre minéral et solution est en contradiction avec la plupart des observations naturelles, suggérant un fractionnement hors équilibre lors de la précipitation des argiles ou de la silice. Par ailleurs, l'amplitude du fractionnement calculé entre H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> et H<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub><sup>-</sup> suggère qu'un rôle important est joué par la spéciation dans les signatures observées naturellement. Nous discuterons des conséquences de ces résultats pour l'explication des fractionnements observés naturellement.

[1] Opfergelt, C.R. *Geoscience* 344 (2012) 723-738

[2] Kowalski et al *GCA* 101 (2013) 285-301

[3] Rustad and Bylaska, *JACS* 129 (2007) 2222-2223

### 8.6.14 (p) Le cycle du fer dans le bassin amazonien vu par ses isotopes

Franck Poitrasson<sup>1,2</sup>, Lucieth Vieira<sup>2</sup>, Daniel Santos Mulholland<sup>1,2</sup>, Patrick Seyler<sup>3</sup>, Francis Sondag<sup>3</sup>, Thierry Allard<sup>4</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brésil

<sup>3</sup>GET/IRD, Toulouse

<sup>4</sup>IMPMC, Paris

Il est important de trouver de nouveaux indicateurs de la réponse des systèmes complexes comme le bassin du fleuve Amazone au changement climatique et à l'augmentation de la pression anthropique. Des études pionnières ont révélé que pour certaines rivières, des fractionnements isotopiques du fer importants étaient observés entre les matières en suspension et la fraction dissoute (Bergquist et Boyle, 2006), et les variations isotopiques ont également été reconnues sur les matières en suspension le long du cycle hydrologique (Ingri et al., 2006). Des études de sols ont aussi montré que les compositions isotopiques du Fe dépendent principalement du contexte climatique (Fantle et DePaolo, 2004 ; Emmanuel et al., 2005 ; Wiederhold et al., 2007 ; Poitrasson et al., 2008). Les isotopes Fe pourraient ainsi devenir un nouveau traceur intéressant des échanges entre les sols, les rivières et la biosphère.

Nous avons donc déterminé la composition isotopique du Fe d'échantillons prélevés lors de missions multidisciplinaires sur le bassin de l'Amazone. Il a été confirmé que les eaux noires et acides, riches en matière organique, montrent un fort fractionnement isotopique du Fe entre les particules et la charge dissoute. En outre, ce fractionnement isotopique varie le long du cycle hydrologique, comme cela avait été précédemment découvert dans les matières en suspension d'une rivière boréale mais dans un sens différent. En revanche, les eaux non-filtrées ont des valeurs très peu variables.

Il a également été constaté que les isotopes du Fe restent un traceur conservatif, même dans le cas de la perte massive de fer pendant le mélange des eaux chimiquement contrastées tels que le Negro et le Solimões. Étant donné que plus de 95 % du Fe de l'Amazone est porté

par des matériaux détritiques en suspension, nous concluons que la signature isotopique du Fe délivré à l'océan Atlantique est indiscernable de la valeur de la croûte continentale, contrairement à des affirmations antérieures.

Nos résultats indiquent que les isotopes Fe dans les rivières représentent un indicateur prometteur de l'interaction entre la matière organique et le fer dans les rivières et la nature de leur source dans les sols. Ils peuvent ainsi devenir un traceur de changements qui se produisent sur les continents en réponse au contexte d'altération et aux activités humaines.

### 8.6.15 (p) Gaseous Hg stable isotope variations in the free troposphere of the Pic du Midi Observatory

Jeroen Sonke<sup>1</sup>, Nicolas Maruszczak<sup>1</sup>, Xuewu Fu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

Mercury (Hg) stable isotope abundances show large variations across biogeochemical reservoirs. These variations result from the gradual fractionation of heavy/light and even/odd Hg isotopes during the multiple physicochemical processes that move Hg across the Earth's surface. No less than five Hg isotope fingerprints (not all understood!) characterize its source, or code for the transformations that Hg undergoes in its biogeochemical cycle. Tracing the dominant natural and anthropogenic Hg emissions at the global level is a challenge. The further Hg emissions travel from their source, the more likely it is that oxidation/reduction, sorption or (de-)methylation reactions modify the original source Hg isotope signatures.

In this presentation we will review Hg isotope signatures of 1. major natural and anthropogenic emission sources, 2. different forms of atmospheric Hg. We will present new observations on atmospheric Hg speciation and Hg isotopic composition of total gaseous Hg (TGM) in the free troposphere of the Pic du Midi Observatory (2877m, France). Small but significant variations in  $\delta^{202}\text{Hg}$  (-0.04 ‰ to 0.51 ‰), and  $\delta^{199}\text{Hg}$  (-0.11 ‰ to -0.31 ‰) were observed throughout the sampling period and are similar to published observations in the terrestrial boundary layer. The  $\delta^{202}\text{Hg}$  variations were highly related to the sources of TGM at the Pic du Midi, with higher values observed mainly under the influence of oceanic air and lower values dominated by continental air. A significant negative correlation between  $\delta^{202}\text{Hg}$  values and atmospheric CO concentrations was observed and suggests that the isotopic composition of TGM in oceanic air masses may differ significantly from those of anthropogenic sources on the European continent.

## 8.7 Cycles biogéochimiques des contaminants en Arctique

### (Biogeochemical cycling of contaminants in the Arctic)

#### Responsables :

- Lars-Eric Heimbürger (Universität Bremen)  
heimburger@get.obs-mip.fr
- Aurelien Dommergue (LGGE, Grenoble)  
dommergue@lgge.obs.ujf-grenoble.fr

#### Abstract :

Global change is affecting the Arctic environment in multiple ways. Arctic warming over the past three decades has modified cryosphere dynamics on land and ocean and affects both geochemical cycling and ecosystem responses. Economical activities in the Arctic are set to increase in the coming decades. This session invites contributions on the cycling of contaminants in the Arctic in relationship with climate change, ecology, and human activities. Contributions on Antarctica and ice-caps that are similarly affected by global change are welcome.

### 8.7.1 (o) Sources and fate of methylated mercury species in the Arctic Ocean

Pascale Baya<sup>1</sup>, Holger Hintelmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trent University, Ontario, Canada

Gaseous mercury (Hg) is a persistent pollutant and can be transported over long distances to remote areas as far as the Arctic. The organic form of Hg, monomethylmercury (MMHg), is the most bioavailable form of Hg and a potent neurotoxin. MMHg is present at elevated concentrations in Arctic marine mammals, often above the consumption guideline of 0.5 µg g<sup>-1</sup>, posing serious health threats to the local populations relying on marine food for subsistence living. However, our understanding of the biogeochemical cycling of MMHg in the Arctic is incomplete because atmospheric sources and sinks of MMHg in the surface ocean-atmosphere interface are still unclear. We assessed the production and loss of methylated Hg species in surface waters by performing incubation experiments using enriched stable isotope tracers. Furthermore, air was sampled in the Canadian Arctic marine boundary layer to quantify, for the first time, atmospheric concentrations of methylated Hg species (both MMHg and dimethylmercury (DMHg)), and estimate the importance of atmospheric deposition as a source of MMHg to Arctic land- and sea-scapes. Methylation of Hg(II) to MMHg as well as DMHg demethylation to MMHg were observed in the presence of oxygen. Experimentally derived rate constants for MMHg methylation and demethylation were  $0.92 \pm 0.82 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$  and  $0.35 \pm 0.25 \text{ d}^{-1}$  respectively. DMHg demethylation rate constant ( $0.98 \pm 0.51 \text{ d}^{-1}$ ) was determined and MMHg production ( $0.04 \pm 0.02 \text{ d}^{-1}$ ) from DMHg demethylation was demonstrated for the first time. These findings suggest that Hg(II) methylation and DMHg demethylation are the main processes controlling the MMHg production in surface water and that they are mainly biologically driven. Atmospheric MMHg and DMHg concentrations averaged  $2.9 \pm 3.6$  (mean  $\pm$  SD) and  $3.8 \pm 3.1 \text{ pg m}^{-3}$ , respectively. We concluded that atmospheric DMHg is of marine origin and that surface water primary production rates and sea-ice cover control its concentration in the marine boundary layer. Summer wet deposition rates of atmospheric MMHg, suspected to be the product of DMHg degradation in the atmosphere, were estimated at 188 ng m<sup>-2</sup> and 19 ng m<sup>-2</sup> for sub-Arctic and Arctic regions, respectively representing a direct and additional source of MMHg for bio-magnification in the pelagic food web.

### 8.7.2 (o) Mercury distribution in the North Atlantic Ocean - results of the 2014 GEOTRACES GEOVIDE cruise

Daniel Cossa<sup>1</sup>, Lars-Eric Heimbürger<sup>2</sup>, Jeroen Sonke<sup>3</sup>, François Lacan<sup>4</sup>, Geraldine Sarthou<sup>5</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>Universität Bremen, Allemagne

<sup>3</sup>GET, Toulouse

<sup>4</sup>LEGOS, Toulouse

<sup>5</sup>Laboratoire des Sciences de l'Environnement Marin, Plouzané

We will present results of the recent French-led GEOTRACES cruise GEOVIDE in the North Atlantic Ocean. Research vessel « Pourquoi pas ? » sailed on 15. May from Lisbon to Greenland to arrive in Newfoundland on 30. June 2014. Total mercury was sampled using an ultra-trace clean rosette and determined on board in a class100 clean container following the US EPA 1631 method. Surface waters of the Gulf Stream are cooled down as they travel north. These cool and dense surface waters dive to depth in the Greenland and Labrador seas. This water mass movement drives global ocean circulation. Global climate relies

on this process. Ongoing climate change makes this a zone of particular interest. This zone also receives atmospheric deposition from Europe and North America where industrial Hg emissions peaked in the 1970s. Here we investigate how climate may impact Hg marine biogeochemical cycle, how anthropogenic Hg makes its way into the ocean interior and whether the temporal evolution of emissions is traceable in water masses of different ages.

### 8.7.3 (o) Biotransformation et volatilisation du Sélénium dans les lacs et mares thermokarstiques de la région subarctique canadienne

Laurent Lancelier<sup>1</sup>, Emmanuel Tessier<sup>1</sup>, Maïté Bueno<sup>1</sup>, Reinhard Pienitz<sup>2</sup>, Frédéric Bouchard<sup>2</sup>, Jean Carignan<sup>2</sup>, David Amouroux<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LCABIE-IPREM, Pau

<sup>2</sup>Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, Canada

Le nombre sans cesse grandissant des mares et lacs thermokarstiques présents dans les régions subarctiques et arctiques témoigne de l'érosion continue et du dégel du pergélisol liés au réchauffement climatique. Ces écosystèmes aquatiques particuliers, généralement riches en matière organique, présentent une forte activité bactérienne pouvant conduire à une anoxie partielle de la colonne d'eau. La capacité de ces réacteurs biogéochimiques à transformer des éléments naturellement présents ou liés à une pollution diffuse tels que le Sélénium (Se) est aujourd'hui inconnue, bien qu'elle soit indispensable pour l'évaluation des risques et de l'exposition de la faune et des populations.

Dans le cadre du projet "Arctic Metals" (ANR-11-CESA-0011) et du programme de recherche TAKUVIK (Université Laval-CNRS), cinq lacs thermokarstiques de la région de Whapmagoostui-Kuujuarapik (Nord du Québec, Canada) ont été échantillonnés. Les concentrations en sélénium étaient de 25-110 ng/L dans les eaux et 0,1-1,6 mg/kg dans les sédiments. Le diméthylsélénium (DMSe) était la seule espèce volatile séléniée et dissoute quantifiable (~2 à 50 pg/L). Afin de déterminer les potentiels de transformation biotique et abiotique des espèces inorganiques de Se, les eaux brutes anoxiques (enrichies ou non en biofilm) de deux lacs ont été incubées 72h à 10°C à l'abri de la lumière après ajout de traceurs isotopiques mono-spécifiques de Se (sélénite enrichie en m/z = 77 et séléniat enrichi en m/z = 82). Des tendances identiques ont été mises en évidence : (i) DMSe est l'espèce prédominante (diméthylsélénium/diméthylsélénium ~ 140), (ii) il est préférentiellement formé à partir de sélénite (jusqu'à 3 fois plus) et (iii) le biofilm contribue fortement au rendement de production (x30 à 85 fois).

### 8.7.4 (o) Mercury and persistent organic pollutants in Arctic seabirds : endocrine and fitness consequences

Olivier Chastel<sup>1</sup>, Sabrina Tartu<sup>1</sup>, Aurélie Goutte<sup>1</sup>, Frédéric Angelier<sup>1</sup>, Pierre Blévin<sup>1</sup>, Geir Wing Gabrielsen<sup>2</sup>, Pierre Labadie<sup>3</sup>, Hélène Budzinski<sup>3</sup>, Jan Ove Bustnes<sup>4</sup>, Paco Bustamante<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Centre d'études biologiques de Chizé, Villiers-en-Bois

<sup>2</sup>Norwegian Polar Research Institute, Tromsø, Norvège

<sup>3</sup>Laboratoire de Physico- and Toxic-Chimie des systèmes naturels, Talence

<sup>4</sup>Norwegian Institute for Nature Research, High North Research Centre on Climate and the Environment, Tromsø - Norvège

<sup>5</sup>Littoral Environnement et Sociétés, La Rochelle

Added to climate change, the Arctic is also subjected to high levels of environmental contaminant such as Mercury (Hg) and persistent organic pollutants (POPs). This may represent a supplementary challenge for top predators such as seabirds which accumulate high levels of these

contaminants. Although toxic effects of Hg and POPs have been described under controlled laboratory conditions, their consequences on long-term fitness have been virtually neglected in free-living vertebrates because of the dearth of long-term data sets that would be required to address this topic. Further, to date very few data are available on the physiological mechanisms (ex : endocrine disruption) involved in the adverse consequences of contaminants exposure in free-living birds. Using long-term field studies on several Arctic (Svalbard) but also Antarctic (Adélie Land) seabirds we investigated relationships between Hg, legacy POPs (PCBs and pesticides), reproductive performances and hormonal mechanisms. Adult mortality was unrelated to POPs or Hg burden, but a negative effect of POPs and Hg on long term fecundity was observed on several species. Further, high POPs burden were associated with other fitness-related traits such as a dull coloration during the mating season. Regarding endocrine disruption, most PCBs-contaminated birds showed an exacerbated stress response and high levels of Hg were associated with impaired secretion of several hormones involved in reproductive behaviors. Endocrine disruption by Hg and legacy POPs can have potential long-term demographic consequences for polar seabirds since most contaminated individuals would be less able to cope with ongoing environmental changes affecting polar regions.

### 8.7.5 (o) Mercury Stable Isotopes Fractionation in Alaskan Marine Top Predators

Jeremy Masbou<sup>1</sup>, David Point<sup>1</sup>, Jeroen Sonke<sup>1</sup>, Paul Becker<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>National Institute of Standards and Technology, Hollings Marine Laboratory, Charleston, South Carolina, États-Unis

With a long residence time on the atmosphere, anthropogenic gaseous Hg(0) is able to reach Arctic far region carried by south-to-north air flows [1]. Propitious deposition conditions [2] and bioaccumulation patterns lead to find record Hg concentrations in Arctic top predators, posing a health risk for northern people due to their reliance on traditional foods [3]. In this region, impacted by serious climate changes, the link between atmospheric Hg emissions and Hg concentrations in Arctic aquatic ecosystems is a big issue. Recent work of Point et al. [4] on Hg stable isotopes in Alaskan seabird eggs shows the close link between sea ice cover and Hg cycle. Here, mammal's complementary measurements have been made to document the extent of Hg stable isotopes fractionation in the Alaskan marine foodweb. Hg stable isotope analyses were conducted in 55 beluga whales (*Delphinapterus leucas*), 53 ringed seals (*Phoca hispida*) and 15 polar bears (*Ursus maritimus*) liver samples collected since 1988. Combining these data, with ecological parameters such as  $\delta^{15}\text{N}$  or  $\delta^{13}\text{C}$ , we point out that mammal's habitat use and associated diet are highly related to Hg isotopes signatures. Belugas appear very sensitive to these parameters and individuals from each stock show significantly different Hg isotopic signatures. Precisely, north to south mass independent fractionation (MIF) pattern clearly appears, involving sea ice cover role in Hg photochemical reactions. This is confirmed by significant MIF temporal trend observed in ringed seals livers. High potential of Hg for tracing food web connectivity is also emphasized, particularly when investigating Hg mass dependent fractionation (MDF) signatures in polar bears and their direct diet ringed seals.

1. Outridge, P.M. et al. Environmental Chemistry 2008, 5 (2), 89-111.
2. Steffen, A. et al. Science of The Total Environment 2005, 342 (1-3), 185-198.
3. Choi, A. L. et al. Environmental Chemistry 2008, 5 (2), 112-120.
4. Point, D. et al. Nature Geoscience 2011, 4 (3), 188-194.

### 8.7.6 (o) High resolution monitoring of Hg species during the 2012 spring flood of the Great Whale River (Canada)

Roman Teisserenc<sup>1</sup>, Lars-Eric Heimbürger<sup>2</sup>, Christelle Lagane<sup>2</sup>, Laure Laffont<sup>2</sup>, Gaël Le Roux<sup>1</sup>, Jeroen E. Sonke<sup>2</sup>, Laure Gandois<sup>1</sup>, Jean-Luc Probst<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EcoLab, Toulouse

<sup>2</sup>GET, Toulouse

Arctic mercury (Hg) research over the last decade has seen much focus on atmospheric Hg dynamics. Recent 3D coupled atmosphere-ocean models of the Arctic Hg cycle suggest however that a large non-atmospheric summertime source of Hg to the Arctic Ocean is necessary to explain the observations and suggest that circumpolar rivers could provide such a source [1]. While this finding is exciting, the actual Arctic river Hg source is ill-constrained and dominated by a snowmelt Hg pulse in spring. Only high-resolution temporal Hg monitoring can constrain the river Hg flux. We sampled the Great Whale River (Canada) during the spring flood in May 2012 with daily resolution. Our Hg speciation results of those river water samples suggest that 1) particulate and dissolved Hg species fluxes are neither non-linear nor correlated with river discharge; we observe a more complex pattern during spring flood composed of several « pulses » of Hg. This demonstrates that Hg transfer from Arctic river basin toward Arctic Ocean is following a highly and non-linear dynamic and 2) that the very high Hg fluxes occur at very first peaks of river discharge, which are usually not sampled for.

1. Fisher, J.A., et al., Riverine source of Arctic Ocean mercury inferred from atmospheric observations. Nature Geosci, 2012, 5(7) : p. 499-504.

### 8.7.7 (p) Identifier les sources de méthylemercure dans un manteau neigeux arctique

Aurelien Dommergue<sup>1</sup>, Alexandre Renard<sup>1</sup>, Jeroen Sonke<sup>2</sup>, Lars-Eric Heimbürger<sup>2</sup>, Catherine Larose<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LGGE, Grenoble

<sup>2</sup>GET, Toulouse

<sup>3</sup>Ampère, Lyon

Mercury is a trace metal emitted in the environment by both natural and anthropogenic sources. Anthropogenic sources such as coal combustion or artisanal gold mining primarily influence levels of Hg in the surrounding environment. However, Hg can be dispersed on a global scale due to the recycling of deposited Hg and because of the long range atmospheric transport of gaseous elemental species. Mercury can reach even the most remote areas of the globe and can enter aquatic food chains, where it can bioaccumulate and biomagnify. Following the trend of atmospheric mercury concentration during the 20th century, mercury concentration in arctic fauna has drastically increased? up to 9-fold depending on the species and the tissues examined - leading to levels exceeding the suggested neurological effect threshold, even in human subjects. Among the Hg(II) species in biological tissues, a large majority (up to 95%) is (mono)methylmercury (CH<sub>3</sub>Hg(II)+, named MMHg hereafter), which is therefore the relevant mercury species in term of toxicology.

In the Arctic, snow represents most of the surface available to Hg deposition. Methylmercury is present in snow at the tenth of picogram per liter (of melted snow) range. Given its high neurotoxicity and ability to biomagnify in the trophic chain, it constitutes a danger when delivered to aquatic ecosystems during the snowmelt (Loseto et al., 2004).

We have performed a 2 month survey of the chemical composition of an arctic snowpack during springtime in Svalbard. We determined concentrations of various elements including major ions and carboxylic acids and mercury species (Total Hg, MMHg and a fraction of bioavailable Hg ).

Using a source-contribution approaches, we propose an identification of the different sources of MMHg that drive the snow concentrations. It highlights a very important contribution of marine emissions, although mechanisms of production were not identified.

## 8.8 Geochemistry of salted solutions and Mobilization of hazardous trace elements in freshwater aquifers in response to CO<sub>2</sub> leakage from deep geological storage

Cette session résulte de la fusion des deux sessions initialement proposées ci-dessous. *This session results from the merge of the two following sessions initially proposed.*

### Géochimie des solutions salées : état de l'art et besoins futurs

#### (Geochemistry of salted solutions : State-of-the-art and future needs)

##### Responsables :

- Laurent Andre (BRGM, Orleans) l.andre@brgm.fr
- Arnault Lassin (BRGM, Orleans) a.lassin@brgm.fr
- Pierre Cézac (LaTep, Pau) pierre.cezac@univ-pau.fr

##### Résumé :

Les saumures naturelles intéressent de plus en plus les industriels, que ce soit en termes d'extraction de substances dissoutes valorisables contenues dans ces eaux (lithium des salars, potassium, ...), de ressources en eau (dessalement), d'exploitations diverses des aquifères salins (stockage de CO<sub>2</sub>...), de gestion de résidus et/ou de problématiques qu'elles génèrent (problèmes d'encrassement induits par l'exploitation des fluides géothermiques et des saumures pétrolières dans les tubages, ...). Cependant, les saumures sont des systèmes géochimiques particulièrement complexes à cause des forces ioniques élevées qui rendent inapplicables les modèles d'activité "classiques". En conséquence, la modélisation géochimique de tels systèmes requiert l'adaptation et la mise en oeuvre d'approches spécifiques capables de prendre en compte les différentes interactions physico-chimiques entre les espèces en solution. Les domaines d'application des modèles actuellement disponibles sont encore limités, que ce soit par le nombre d'espèces chimiques ou par l'extension en température et en force ionique. Plusieurs facteurs expliquent ces limitations : la robustesse des modèles, la quantité de données expérimentales sur lesquelles ajuster les paramètres des modèles, la cohérence et la qualité des paramètres d'ajustement renseignés dans les bases de données existantes. Parmi les problématiques récurrentes ou émergentes nécessitant des efforts particuliers, on peut citer le comportement des éléments traces, les réactions d'oxydoréduction, et le comportement des microorganismes en milieu salé.

Cette session a pour but de réunir des spécialistes des solutions salées, qu'ils soient expérimentateurs, modélisateurs ou industriels confrontés à la problématique de la caractérisation des saumures et à leur exploitation. Il s'agit :

- pour les expérimentateurs, de présenter les dernières avancées et les verrous technologiques actuels en matière de mesures spéci-

ifiques menées sur ce type de solutions (coefficient osmotique, mesures hygroscopiques, densité, solubilité, calorimétrie, caractérisation des sels, ...);

- pour les modélisateurs, de montrer quelles sont les potentialités mais aussi les limites actuelles des modèles et des codes de calcul géochimique et des procédés, ainsi que d'exprimer leurs besoins en données expérimentales pour calibrer leurs approches numériques;
- pour les industriels, de présenter des cas concrets d'application et les verrous technologiques qu'il faudrait lever pour maîtriser la réactivité et la thermodynamique des saumures naturelles et industrielles.

Cet échange et partage de connaissances au sein d'une même session est une opportunité pour favoriser la communication entre les différentes populations. En prenant connaissance de l'état des lieux et en appréhendant les besoins et les limites de chaque discipline, les participants auront davantage d'éléments pour identifier et proposer des pistes de progrès et des voies de recherche et développement pour les prochaines années.

**Mots-clés :** saumures, thermodynamique des systèmes salés, expérimentation, modélisation, solubilité des sels

##### Abstract :

Natural brines are of major interest for industrials, because of the valuable chemical elements dissolved in these waters (lithium, potassium ...), water resources (desalination), for exploitation of deep saline aquifers (CO<sub>2</sub> storage ...), management of deposits (problematic of scaling in tubings during the exploitation of geothermal fluids and oil brines ...). However, brines are complex geochemical systems because of the high ionic strengths that prevent the use of « classical » activity models. Consequently, geochemical modeling of such systems requires the implementation of a specific approach able to consider the numerous physico-chemical interactions between the aqueous components in solution. The fields of application of the available numerical models are limited, in terms of chemical species and ranges of temperature and of ionic strength. Many factors can explain these limitations : the robustness of the model, the amount of experimental data from which model parameters can be adjusted, the coherence and the quality of the adjusted parameters implemented in the thermodynamic databases. Among the emerging issues needing specific efforts, we can quote the geochemical behavior of trace elements, redox reactions and the behavior of microorganisms in salted solutions.

The goal of this session is to gather specialists of salted solutions, experimenters, modelers or industrials who are facing to the problematic of brines and salts characterization and to their exploitation :

- Experimenters can present the last developed technologies concerning specific measurements on this type of solutions (osmotic coefficient, hygroscopic measurements, density, salt solubility, calorimetry, salt characterization...);
- Modelers can show the potential but also the current limitations of the calculation codes, but also their needs of experimental data in order to calibrate numerical approaches;
- Industrials can present application cases and technological limitations that they have solved in order to manage the reactivity and the thermodynamic behavior of natural and industrial brines either used or produced in their facilities.

This session is a good opportunity to favor exchanges and knowledge sharing between the different populations. By establishing this state-of-the-art and by understanding the needs and the limits of each discipline, the participants will have possibility to better estimate and identify the progress lines and some directions for the research & development in the coming years.

**Keywords :** brines, thermodynamic of salted solutions, experimental and modeling approaches, salt solubility

## **Mobilization of hazardous trace elements in freshwater aquifers in response to CO<sub>2</sub> leakage from deep geological storage**

### **Responsables :**

- German Montes-Hernandez (ISTerre, Grenoble)  
montesg@ujf-grenoble.fr
- François Renard (ISTerre, Grenoble)  
francois.renard@ujf-grenoble.fr

### **Abstract :**

The possible intrusion of CO<sub>2</sub> into a given freshwater aquifer due to leakage from deep geological storage involves a decrease in pH, which has been directly associated with the release and/or remobilization of hazardous trace elements via mineral dissolution and/or via desorption processes. In recent years, this issue has been studied using numerical simulations, laboratory experiments and field tests. Generally, these studies have been conducted under different conditions and used different materials. For this simple reason, different conclusions have drawn regarding whether a particular hazardous trace element will be released or not and to what extent it will be released. This present session welcomes all experimental, modeling or field tests involving the CO<sub>2</sub> intrusion in freshwater aquifers..

### 8.8.1 (o) Designing the Joint Expert Speciation System (JESS) solubility database for reactive solutions

Darren Rowland<sup>1</sup>, Peter May<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Chemistry, Murdoch University, Australie

At the present state-of-the-art, the modelling of equilibria occurring in concentrated reactive electrolyte mixtures remains problematic : the theoretical deficiencies related to calculating the activity of species in multicomponent solutions seem unlikely to be overcome soon. However, thermodynamic data for reactive systems, e.g. solubility values, are widespread in the chemical literature and need to be better utilised.

A key challenge for storing thermodynamic data for reactive systems is expressing the complete chemistry of a large number of potentially complicated solutions - such as phosphate and borate buffers - in a compact, and ultimately machine-processable, form. The approach taken to date (e.g. [1]) records only the analytical concentrations of well-defined components. This means that information relating to the chemical behaviour of the solution components, needed for eventual processing of experimental data, is not stored. In our design, all solution species and the set of allowed reactions are defined, which is necessary and sufficient for describing the chemistry of complex solutions.

A database system implementing this design is in development building upon our existing chemical reaction [2] and physicochemical property [3] databases. Accordingly, the new database can store a vast range of properties including solubility, pH, density, mean activity coefficients and equilibrium constants. In the future, at least five million experimentally-determined property values will be available with which to parameterise new or existing theoretical solution chemistry frameworks. Methods to harmonise these data, which is a preliminary step prior to extracting reliable thermodynamic parameters for modelling, are described.

References : [1] IUPAC-NIST Solubility Database (Online), <http://sr-data.nist.gov/solubility/index.aspx>

[2] May P.M., Murray K., J. Chem. Eng. Data, 46, (2001) 1035-1040.

[3] May P.M., Rowland D., Königsberger E., Hefter G., Talanta, 81, (2010) 142-148.

### 8.8.2 (o) Thermodynamic characterization of electrolytic solutions using the Pitzer model : calculations of dilution enthalpy and heat capacity

Adeline Lach<sup>1,2</sup>, Laurent André<sup>1</sup>, Arnault Lassin<sup>1</sup>, Mohamed Azaroual<sup>1</sup>, Pierre Cézac<sup>2</sup>, Jean-Paul Serin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>LATEP, Pau

The aim of this study is to compute the dilution enthalpy and the heat capacity of aqueous solutions with the Pitzer's model. Indeed, the dilution enthalpy can be calculated using the apparent relative molal enthalpy, which is the temperature derivative of the excess Gibbs energy. The heat capacity of the solution is computed using the apparent molal heat capacity ; the equation is obtained from the temperature derivative of the apparent relative molal enthalpy. Using the excess Gibbs energy defined by Pitzer [1], we obtain one equation for describing the apparent relative molal enthalpy and one for the apparent molal heat capacity. Parameters for these two equations are defined from the specific interaction parameters used to calculate the osmotic coefficient. As a consequence the apparent relative molal enthalpy can be expressed with the first derivative of interaction parameters with respect to temperature. The apparent molal heat capacity can be expressed with a combination

of first and second temperature derivative of interaction parameters. These equations have been implemented in the Phreeqc-3 software [2] and tested on systems for which the temperature dependence of interaction parameters is known. Monovalent and divalent binary systems have been tested (NaCl, KCl, CaCl<sub>2</sub> and MgCl<sub>2</sub>) as well as ternary systems (NaCl-CaCl<sub>2</sub>, NaCl-MgCl<sub>2</sub> and CaCl<sub>2</sub>-MgCl<sub>2</sub>). For the ternary systems, we worked only on the heat capacity because of the lack of experimental data of dilution enthalpy. The parameters for monovalent electrolytes allow calculating data with a good accuracy whereas some discrepancies exist for divalent electrolytes. New interaction parameters were determined for these systems.

#### References

[1] K.S. Pitzer, Activity coefficients in electrolyte solutions, 2nd ed., 1991.

[2] D.L. Parkhurst, C.A.J. Appelo, User's guide to PHREEQC (Version 2) : a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, (1999).

### 8.8.3 (o) Oil and gas reservoir brines : geochemical problematics and needs for adapted thermodynamic databases

Eric Gaucher<sup>1</sup>, Arnault Lassin<sup>2</sup>, Laurent André<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

Since decades, the knowledge and control of geochemical processes in salted aqueous solutions is a topic of interest, in particular for predicting salinity data and optimizing operating conditions in oil and gas reservoirs. A number of projects have allowed TOTAL to develop skills and methodologies for characterizing and forecasting scaling issues as well as the related technological risks. Some of these studies have been carried out in collaboration with BRGM [1]. The adopted predictive approach relies on the modeling of the thermodynamic properties of salted aqueous solutions according to the Pitzer formalism [2].

However, the existing thermodynamic databases are fragmented or limited regarding the size of the chemical systems that can be consistently handled. For a given chemical system, this limitation may concern the nature of the salts, the concentration and/or the temperature and/or the pressure range [3]. With the objective to extend and diversify applications, it is needed to enrich thermodynamic databases with the inclusion of chemical elements which are present in low concentrations in natural aqueous solutions. Indeed, in oil and gas reservoirs, the description of their chemical behavior must be made possible at high ionic strengths for in situ temperature, pressure, pH and redox conditions.

In order to illustrate these needs, examples of oil fields natural brines will be shown. Scaling risks and geochemical behavior of mixtures of chemically contrasted waters will be evaluated using different existing numerical tools and databases. Results will be compared to point out discrepancies and gaps to fill.

#### References

[1] Azaroual et al. (2004), Desalination 165, 409-419.

[2] Pitzer (1991) Activity coefficients in electrolyte solutions, 2nd ed., CRC Press

[3] Christov (2005) J. Chem. Thermod. 37, 1036-1060.

### 8.8.4 Keynote communication : Potential impacts of CO<sub>2</sub> geological storage on shallow groundwater quality

Julie Lions<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>CO2GeoNet Association

Over the last few years, the issue of potential leakage of CO<sub>2</sub> into shallow groundwater has been subjected to both modelling and experimental approaches. Through those studies and reviews, several potential mechanisms have been identified that can modify the water composition of groundwater resources.

Leakage of CO<sub>2</sub> into shallow aquifers may potentially occur through faults, fractures or wells or through lateral migration. Solubilisation of CO<sub>2</sub> will lead to acidification and subsequent mineral dissolution or desorption processes that can increase concentrations of hazardous trace elements, eventually exceeding maximum contaminant levels for drinking waters. The CO<sub>2</sub>-induced geochemical reactions will depend to a large extent on the CO<sub>2</sub> intrusion rate, the aquifer mineralogy and geochemical background conditions; in particular pH and redox conditions. The mass transfer through geochemical reactions in freshwater aquifers is orders of magnitudes smaller than in the reservoir interactions at depth and the amounts of CO<sub>2</sub> needed to produce a significant effect on potable groundwater are much less than within the saline host formation. In consequence, geochemical processes need to be well understood to take into account processes like ion exchange, surface complexation and redox reactions. In fact, several models have demonstrated significant impact of CO<sub>2</sub> leakage into freshwater aquifers through the release of trace metal(oid)s (e.g. As and Pb). At the opposite, in situ tests show very weak trace element mobility. Indeed, the mobility of trace elements is reversible as scavenging effects may occur due to (i) the evolution of the physicochemical properties of the water during and after leakage and (ii) the interactions with the solid phases.

The question whether the effects of CO<sub>2</sub> leakage are deleterious for drinking water quality should take into consideration the complexity of the mechanisms that control the mobility of contaminants in natural system.

### 8.8.5 Keynote communication : Interaction eau-roche-CO<sub>2</sub> en contexte de fuite contrôlée de CO<sub>2</sub> : apport du monitoring géochimique et isotopique lors d'un cas réel d'injection de CO<sub>2</sub>

Philippe Negrel<sup>1</sup>, Pauline Humez<sup>2</sup>, Vincent Lagneau<sup>3</sup>, Julie Lions<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>Department of Geoscience, University of Calgary, Canada

<sup>3</sup>École des mines de Paris, Paris

Cette étude montre, dans un cas réel d'injection de CO<sub>2</sub>, comment une approche multi-isotopique (B, Li, S, O, Sr) combinée aux données chimiques permet (i) de tracer indirectement la réactivité et présence du CO<sub>2</sub>, (ii) de contraindre et comprendre précisément les interactions eau-roche-CO<sub>2</sub> et les réponses isotopiques.

L'originalité de ce travail consiste à utiliser des outils isotopiques développés dans les géosciences pour les appliquer à ce contexte particulier. L'idée majeure est d'utiliser ces outils comme traceurs des interactions eau-roche-CO<sub>2</sub> afin de détecter toute anomalie de fuites de CO<sub>2</sub> non décelables par les autres moyens de monitoring existants.

La mise en œuvre des outils isotopiques a permis de faire avancer les méthodologies de monitoring géochimique nécessaire pour la surveillance des sites de stockage géologique de CO<sub>2</sub> et le traçage des fuites de potentielles de CO<sub>2</sub>. Cette étude porte sur l'impact et le traçage des fuites précoces de CO<sub>2</sub> provenant d'un réservoir géologique de stockage de CO<sub>2</sub> sur les aquifères d'eau douce.

Une application grandeur nature, dans le cadre du projet CO<sub>2</sub>FieldLab sur le site de Svelvik en Norvège, a consisté en une injection de CO<sub>2</sub>

de 20 m de profondeur dans un aquifère stratifié (1.67 tonnes de CO<sub>2</sub> ont été injectées sur une période de six jours). Ce cas d'étude a permis de mettre en place le programme de monitoring isotopique et le suivi de l'évolution d'un hydro-système naturel d'eau souterraine. Cette étude a fourni une approche complémentaire des processus qui ne peuvent être étudiés ou ne sont pas nécessairement pris en compte dans les modélisations numériques ou à l'échelle du laboratoire, par exemple, les intrusions salines. Des changements importants dans les signatures isotopiques et chimiques de l'eau pendant la durée de l'expérience ont indiqué trois processus : 1) de mélange entre l'eau de mer et l'eau de pluie suite à une intrusion saline, 2) de processus d'échange ionique à l'interface eau-douce / eau salée et 3) d'interactions eau-roche-CO<sub>2</sub> (e.g. processus de dissolution/précipitation, etc.) engendrées par les conditions acides du fait de la dissolution du CO<sub>2</sub>.

L'efficacité de cette approche globale géochimique et isotopique permet de distinguer les processus et phénomènes naturels et les processus liés à l'injection de CO<sub>2</sub>.

### 8.8.6 (o) Intrusion of CO<sub>2</sub> and impurities in a freshwater aquifer - impact evaluation by reactive transport modelling

Nicolas Jacquemet<sup>1,2</sup>, Géraldine Picot-Colbeaux<sup>1</sup>, Chan Quang Vong<sup>1</sup>, Julie Lions<sup>1</sup>, Olivier Bouc<sup>1</sup>, Jeremy Rohmer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>Consultant géochimiste indépendant, Toulouse

Contamination of fresh groundwater is one of the environmental issues of Carbon Capture and Storage. We simulate with the reactive transport code TOUGHREACT the intrusion of CO<sub>2</sub>+impurities from oxycombustion capture in a freshwater aquifer model based on a glauconitic sandstone aquifer. We choose an unfavorable scenario where the contaminant gas presents maximal contents in SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> and O<sub>2</sub>. Water quality changes after a 10 years intrusion are exposed. French quality standards in pH, Fe, Mn and sulphates concentrations for drinking water are reminded in the results for reference.

Acidification and carbonation of water induces Fe- and Mn-bearing minerals dissolution that increases the concentration of these metals in water. Contamination by sulphates is due to the SO<sub>2</sub> oxidation by O<sub>2</sub>, both of these components being carried by the contaminant gas. The vertical extent of contamination is enhanced by both the upward migration of gaseous CO<sub>2</sub> and downward migration of dense carbonated water. The presence of SO<sub>2</sub> and NO in the contaminant gas, even in very low concentrations, induces a negative local pH shift of 1 unit by comparison with a pure-CO<sub>2</sub> contaminant gas. This pH shift has consequences on Fe and Mn release amplitude. The code does not allow realistic modelling of the fate of NO<sub>x</sub> in the aquifer. But we hypothesize this component to be oxidized by O<sub>2</sub> into nitrite or nitrates (health-significant substances) that persist into the aquifer. Perspectives are addressed.

Reference :

Nicolas Jacquemet, Géraldine Picot-Colbeaux, Chan Quang Vong, Julie Lions, Olivier Bouc, Rohmer Jérémy (2011) Intrusion of CO<sub>2</sub> and impurities in a freshwater aquifer - Impact evaluation by reactive transport modelling. Energy Procedia, Volume 4, 3202-3209 (10th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies).

### 8.8.7 (p) Thermodynamic modelling of lithium chloride-bearing fluids

Michel Dubois<sup>1</sup>, Christophe Monnin<sup>2</sup>, Arnaud Gauthier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LGCgE, Lille

<sup>2</sup>GET, Toulouse

Lithium chloride can concentrate in natural fluids associated with late magmatic or evaporitic environments. It is therefore useful to investigate the H<sub>2</sub>O-LiCl system and the H<sub>2</sub>O-LiCl-NaCl systems in order to interpret phase transitions in fluid inclusions of such environments.

Numerous experimental data are available in these systems (see reviews in Monnin et al., 2002 and Dubois et al., 2010) in addition to data obtained using the synthetic fluid inclusion technique (SIF) (Dubois et al., 2010). In addition Raman analysis has been performed to record spectra on the different phases (aqueous LiCl-bearing solution, ice and hydrates) in inclusions and in pure solids.

The ternary system contains numerous salts (4 lithium chloride hydrates, hydrohalite and anhydrous salts) and has a very low eutectic temperature (-77°C). Thermodynamic modelling was applied using Pitzer's formalism. At very low temperature (<-40°C), the model requires a modification of the expression of the ice solubility product. The Pitzer's model is suitable for temperatures from ~-75°C to 100°C and salinities up to 12 mol/kg.

Isotherms for the ice, hydrohalite and halite fields (up to 100°C) in the ternary system H<sub>2</sub>O-LiCl-NaCl were calculated. This work therefore provides a thermodynamic model to determine salt concentrations in lithium-rich inclusions.

The SIF technique has revealed some limits due to metastability and difficulties to identify phases in complex solid mixtures. The micro-capillary approach performed on the system will provide more precise solubility data and phase transition characterisation. References :

Dubois, M., Monnin, C., Castelain, T., Coquinot, Y., Gouy, S., Gauthier, A. et Goffé, B. (2010) : Investigation on the H<sub>2</sub>O-NaCl-LiCl system : A synthetic fluid inclusion study and thermodynamic modeling from 50 to 100°C and up to 12 mol/kg. *Econ. Geol.*, 105, 328-338

Monnin M., Dubois, M., Papaiconomou, N., Simonin, J.P. (2002) Thermodynamics of the LiCl-H<sub>2</sub>O System. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 47, 1331-1336

### 8.8.8 (p) Study of the binary NaOH-H<sub>2</sub>O system and its extension to two ternary highly concentrated systems (NaOH-NaCl-H<sub>2</sub>O and NaOH-LiOH-H<sub>2</sub>O) up to high temperature

Adeline Lach<sup>1,2</sup>, Laurent André<sup>1</sup>, Arnault Lassin<sup>1</sup>, Mohamed Azaroual<sup>1</sup>, Pierre Cézac<sup>2</sup>, Jean-Paul Serin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>LATEP, Pau

This study presents a new parameterization of the NaOH-H<sub>2</sub>O system able to calculate the excess properties (osmotic coefficient, activity coefficient) of electrolyte solutions between 0 and 250°C and for concentrations up to salt saturation (higher than 30 M according to temperature). Two scenarios have been examined using the thermodynamic Pitzer's model [1] : (1) NaOH is treated as fully dissociated ; (2) NaOH is partially dissociated and the neutral aqueous species NaOH<sub>0</sub>(aq) is explicitly introduced in the model. The optimization procedure is gradual, starting with the simplest parametrization before complexing the approach up to satisfactorily representing the excess properties of the solutions. First, the scenario (1) was considered and three parameters ( $\beta(0)$ ,  $\beta(1)$  et  $C\phi$ ) were optimized. Then the parameters  $\beta(2)$  and  $\alpha_2$  were optimized. As the results were not fitting the experimental data we moved to the scenario (2) by introducing NaOH<sub>0</sub>(aq) with two ternary parameters ( $\zeta_{\text{NaOH}/\text{Na}^+/\text{OH}^-}$  and  $\lambda_{\text{NaOH}/\text{NaOH}}$ ) in addition to  $\beta(0)$ ,  $\beta(1)$  et  $C\phi$  and the thermodynamic equilibrium constant (KNaOH). These parameters have been optimized between 0 and 250°C with experimental measurements of osmotic coefficient and water activity. We also studied the solubility of NaOH in water by determining the thermodynamic solubility products of the five hydrated salts (NaOH :nH<sub>2</sub>O

with n=1, 2, 3, 1.1, 3.5 and 4). The parameterization of the NaOH-H<sub>2</sub>O system was used, without new adjustment, to predict the boiling point raise of NaOH solutions according to salinity. To finish, we studied two ternary systems (NaOH-NaCl-H<sub>2</sub>O and NaOH-LiOH-H<sub>2</sub>O) by adjusting mixture interaction parameters. The model calculates with a high accuracy the properties of these solutions and the solubility of hydrated salts up to high temperature.

#### References

[1] K.S. Pitzer, Activity coefficients in electrolyte solutions, 2nd ed., 1991.

### 8.8.9 (p) NMR investigation of lithium chloride aqueous speciation up to high concentrations

Valérie Montouillout<sup>1</sup>, Arnault Lassin<sup>2</sup>, Anne-Laure Rollet<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation, Orléans  
<sup>2</sup>BRGM, Orléans  
<sup>3</sup>PHENIX, Paris

#### Introduction

The chemical behaviour of dissolved lithium chloride is highly non-ideal and very complex because of its very high solubility (up to 40 mol/kgw, depending on temperature).

Some existing geochemical models are theoretically able to describe the chemical behaviour of lithium minerals - brines systems. The ion-specific interaction model developed by Pitzer [1] is particularly well suited for dealing with ionic strengths ranging from low up to very high salinities, i.e. above several tens of moles per kg of water. However, this model is semi-empirical and the ion-specific interaction parameters must be adjusted. The determination of such parameters requires numerous experimental data. The goal of this work is to provide new experimental information about the aqueous speciation of dissolved lithium chloride by NMR measurements. Results are used in order to constraint the numerical modelling [2].

#### Description of the work

In this work, we studied the binary LiCl-H<sub>2</sub>O and the ternary LiCl-LiOH-H<sub>2</sub>O chemical systems. Five binary aqueous solutions have been prepared with concentrations ranging from 0.1 up to 20 M of LiCl. Two ternary aqueous solutions have also been prepared with 18 M of LiCl and 2 and 3 M of LiOH. The NMR spectra of <sup>37</sup>Cl and <sup>7</sup>Li of each sample have been acquired at room temperature.

#### Main results

For the aqueous chloride, a change of the NMR spectra evolution vs concentration occurs between 10 and 15 M LiCl. It suggests a modification of the chloride ion local environment that can be interpreted with the existence of the aqueous complex LiCl<sub>0</sub>.

On the contrary, adding LiOH into the system does not induce further shift in the chloride ion spectra. This suggests that chloride speciation is not modified by the investigated increase of pH.

#### References

[1] Pitzer (1991) Activity coefficients in electrolyte solutions, 2nd ed., CRC Press

[2] Lassin et al. (2014) *Am. J. Sci.* (accepted with corrections).

### 8.8.10 (p) Reactive transport modeling of trace elements at the seawater-brine transition of an anoxic marine basin (Orca Basin, Gulf of Mexico)

Eric Viollier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

1D reactive transport modeling constrained by chemical distributions and S and T data is utilized to quantify reaction rates, fluxes and identify the biogeochemical pathways that control the cycles of Ba, Mo, U, Co and Ge at the oxic-anoxic transition of the Orca Basin. Vertical mixing coefficients are calculated from sedimentary stationary heat flux in a double diffusion physical context. Discussion of reaction rates obtained for the different reactive zones, by a minimization algorithm, allows a better understanding of sediment records.

### 8.8.11 (p) Impact of a CO<sub>2</sub> leakage on groundwater quality. Influence of regional flow using reactive transport model

Clément Jakymiw<sup>1</sup>, Nicolas Devau<sup>1</sup>, Pauline Humez<sup>2</sup>, Vanessa Barsotti<sup>3</sup>, Julie Lions<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>University of Calgary, Alberta, Canada

<sup>3</sup>ISTO, Orléans

Carbon Capture and Storage in deep and saline aquifers is one of the available technologies to reduce CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere. However, CO<sub>2</sub> leakages into shallow freshwater aquifers are one identified risk and potential impacts on groundwater quality have to be studied. A better understanding on how it could affect water quality, aquifer minerals and trace elements release is necessary to develop a future storage site. Moreover, monitoring and remediation solutions have to be evaluated before storage operations. As part of the ANR project CIPRES, we present reactive transport modeling studies.

In a 3D model using ToughReact2, we perform different CO<sub>2</sub> leakage scenarios (brines and CO<sub>2</sub>) in a confined aquifer. Our models are based on the Albian aquifer at 700 m deep, a strategic water resource for the Paris basin, overlying the Dogger and Trias deep saline aquifers. The model consists in a mesh, divided roughly in 20000 cells making a 60 m thick and a 500 m large layer. Around the leakage point, cells are subdivided to consider or assess local water-rock interactions (secondary precipitation, minerals reaction kinetics, sorption/desorption...). The geochemical model (chemistry and mineralogy) was elaborated from experimental data performed in a previous study (Humez, 2012). We observe different geochemical behavior (CO<sub>2</sub> plume shape, secondary precipitations, desorption...) according to different horizontal flow rate influenced directly by the hydrodynamics (regional groundwater

flow). We highlight the importance of surface complexation processes on trace element mobilization (As, Zn and Ni). Understanding how geochemical reactions and regional flows influence water chemistry, allows to ascertain measurement, monitoring, verification plan and remediation works in case of potential leakage considering a given location.

### 8.8.12 (p) Experimental Assessment of CO<sub>2</sub> - Mineral-Toxic Ion Interactions in a Simplified Freshwater Aquifer : Implications for CO<sub>2</sub> Leakage from Deep Geological Storage

German Montes-Hernandez<sup>1</sup>, François Renard<sup>1</sup>, Romain Lafay<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

The possible intrusion of CO<sub>2</sub> into a given freshwater aquifer due to leakage from deep geological storage involves a decrease in pH, which has been directly associated with the remobilization of hazardous trace elements via mineral dissolution and/or via desorption processes. In an effort to evaluate the potential risks to potable water quality, the present study is devoted to experimental investigation of the effects of CO<sub>2</sub> intrusion on the mobility of toxic ions in simplified equilibrated aquifers. We demonstrate that remobilization of trace elements by CO<sub>2</sub> intrusion is not a universal physicochemical effect. In fact goethite and calcite, two minerals frequently found in aquifers, could successfully prevent the remobilization of adsorbed Cu(II), Cd(II), Se(IV) and As(V) if CO<sub>2</sub> is intruded into a drinking water aquifer. Furthermore, a decrease in pH resulting from CO<sub>2</sub> intrusion could reactivate the adsorption of Se(IV) and As(V) if goethite and calcite are sufficiently available in underground layers. Our results also suggest that adsorption of cadmium and copper could be promoted by calcite dissolution. These adsorbed ions on calcite are not remobilized when CO<sub>2</sub> is intruded into the system, but it intensifies calcite dissolution. On the other hand, arsenite As(III) is significantly adsorbed on goethite, but is partially remobilized by CO<sub>2</sub> intrusion. For more details refer to Montes-Hernandez et al., (2013).

References

G. Montes-Hernandez, F. Renard, R. Lafay. Experimental assessment of CO<sub>2</sub>-mineral-toxic ion interactions in a simplified freshwater aquifer : Implications for CO<sub>2</sub> leakage from deep geological storage, Environmental Science & Technology 47 (2013) 6247-6253.



# Thème 9

## Hydrosciences - *Hydrosciences*

Animateurs : Alain Bourg (UPPA, Pau), Christophe Emblanch (Avignon)

### 9.1 Processus hydrochimique et isotopique dans les eaux souterraines

**Responsables :**

- Michel Franceschi (ENSEGID, Bordeaux)  
michel.franceschi@ipb.fr
- Philippe Négrel (BRGM)  
p.negrel@brgm.fr

**Résumé :**

L'acquisition de la composition chimique des eaux souterraines et l'estimation des temps de résidence sont des données indispensables dans un contexte actuel de gestion raisonnée des ressources en eaux. Cette session est consacré aux études géochimiques, et isotopiques dans les eaux souterraines. Il abordera les travaux théoriques et pratiques.

Une partie de cette session sera donc consacrée à la présentation des avancées technologiques et des nouveaux outils permettant une caractérisation plus précise des temps de résidence des eaux et des méthodes de datation. Une autre partie sera consacrée aux études à l'échelle régionale des systèmes aquifères dans lesquelles l'utilisation des des outils géochimique permettent de mieux appréhender le fonctionnement des aquifères régionaux avec une mise en adéquation entre les modèles géochimiques et hydrogéologiques.

### 9.1.1 (o) Salinité des ressources en eau souterraine : empiètement des saumures sous les sebkhas et interaction eaux-roches (Sud-est Tunisie)

Mohsen Ben Alaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Unité de Recherche Géomatique, Géologie Structurale et Appliquée, El Manar II, Tunisie

Le flux migratoire de la population vers les grandes villes et la multiplication des activités industrielles et agricoles, lors de ces dernières années, ont provoqué un accroissement des besoins en eau de la nappe de la Jeffara de Gabès (SE Tunisie). Cette forte sollicitation a produit une augmentation de la minéralisation et une dégradation de la qualité hydrochimique (salinité) des eaux souterraines. Ce travail a pour objectif de suivre l'évolution spatiale de la qualité hydrochimique des eaux souterraines et de comprendre le processus de cette minéralisation en fonction de l'empiètement des saumures sous les sebkhas et l'interaction eaux-réservoirs. En s'appuyant sur des méthodes géochimiques en particulier le Bore, le strontium et le rapport Sr<sup>2+</sup>/Ca<sup>2+</sup>, ce travail a permis de démontrer que la forte salinité des eaux de cette nappe s'explique par une interaction entre ses eaux et les niveaux évaporitiques qui constituent le substratum de cette nappe et par l'intrusion d'eau salée à partir des sebkhas. Ces eaux de qualité médiocre à mauvaise sont caractérisées par des interactions géochimiques : échanges de bases et phénomènes de précipitations/dissolutions des minéraux des formations aquifères. En outre, le croisement des informations fournies par cette approche géochimique a permis d'esquisser un modèle conceptuel de fonctionnement hydrogéochimique de ce système aquifère. Ainsi, l'application de mesures de protection du système aquifère de la Jeffara, tenant compte de ce modèle, permettra de gérer au mieux cette ressource pour les générations futures.

### 9.1.2 (o) Apport de l'hydrochimie à l'étude des mélanges complexes des remontées thermominérales en vallée alpine : exemple de Salins-les-Thermes (Savoie, France)

Camille Doublet<sup>1</sup>, Marc Dzikowski<sup>1</sup>, Dominique Gasquet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EDYTEM, Le Bourget du Lac

Les grands accidents tectoniques alpins sont propices à la mise en place de circulations thermo-minérales profondes. La remontée en surface, localisée en fond de vallée donne généralement lieu à des mélanges avec des eaux issues d'un ou plusieurs horizons aquifères superficiels. La compréhension des processus et des mécanismes de mélange qui accompagne la remontée thermique constitue alors un enjeu primordial dans la gestion de la ressource.

Le secteur des émergences de Salins-les-Thermes (Vallée de la Tarentaise) illustre la complexité du processus terminal de remontée thermique en présence de mélanges. En effet, sur cette zone d'environ 1000 m<sup>2</sup>, un ensemble de sources présente une variabilité spatiale des valeurs de température et de conductivité - s'étendant respectivement entre 9 et 39 °C et entre 1 et 29 mS/cm - ainsi que des variations temporelles. Des circulations au sein de potentiels réservoirs superficiels sont ainsi susceptibles de provoquer des mélanges avant ces émergences.

L'analyse des paramètres physiques (température, débits sur certaines venues) et chimiques des eaux (éléments majeurs) ont permis de conceptualiser les processus de mélanges lors de la remontée thermique. Cette conceptualisation repose sur la présence d'une circulation thermique profonde, en contact avec des formations salifères, et de mélanges

avec des eaux superficielles de nappe en milieu alluvionnaire et de versant au sein de formations dolomitiques. Elle est établie à partir d'hypothèses sur les pôles spécifiques des eaux associés à chaque formation aquifère ainsi que sur les calculs des taux de mélanges au niveau des venues ayant fait l'objet de mesures. Les taux relatifs sont établis à partir de lois de mélange appliquées dans un premier temps aux teneurs en chlorures et aux températures puis vérifiées à partir des autres ions majeurs.

### 9.1.3 (o) Chlorine and bromine stable isotopes covariations in a deep basinal brine

Thomas Giunta<sup>1</sup>, Magali Ader<sup>1</sup>, Randall Locke<sup>2</sup>, Pierre Agrinier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>Illinois State Geological Survey, Illinois, États-Unis

The Mount Simon Sandstone (Mt. Simon) is the deepest sedimentary formation of the Illinois Basin (USA). This formation was chosen by the Midwest Geological Sequestration Consortium to demonstrate the potential for carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) geological storage. Chlorine and bromine stable isotopes were used to investigate saline fluids from Mt. Simon to better understand their origin and present day hydrodynamic regime. Basinal brines were sampled at 10 different depths (from -1499m to -2128m) using a Westbay\* multilevel groundwater characterization and monitoring system in September 2011.  $\delta^{37}\text{Cl}$  and  $\delta^{81}\text{Br}$  data exhibit a clear upward trend within the Mt. Simon, respectively ranging from 0.2 ‰ and +1.17 ‰ in the deepest part of the formation to  $-0.8 \pm 0.05$  ‰ and  $-0.45$  ‰ in the upper part. The two samples from the Ironton-Galesville Sandstone (the unit above the MSS and the Eau Claire Formation caprock) were determined to be non-representative [1].

We interpret the isotopic trend observed in the Mt. Simon in terms of known geological processes that fractionate chlorine isotopes : (a) evaporation of ancient seawater that leads primary brine to form [2,3]; and (b) fluid transport processes occurring during and after burial diagenesis, which are known to be able to further modify the Cl isotopic signature of evaporation, such as chemical diffusion [4] or ion filtration [5]. However, isotope compositions expected for primary brines are lower than observed, thus not explaining the full range of the Mt. Simon trend. The likelihood of these hypotheses must now be investigated with respect to other geochemical tracers. This on-going work clearly illustrates that Cl and Br isotopes have a strong potential to characterize important aspects of long-term hydrology for formation waters.

[1] Locke et al., (2013). [2] Fontes et al., (1993). [3] Eggenkamp et al., (1995). [4] Estaoe et al., (2001). [5] Phillips et al., (1987).

\*Mark of Schlumberger

### 9.1.4 (o) Caractérisation de la paléorecharge des aquifères du nord du Bassin aquitain par l'utilisation de traceurs isotopiques et des gaz rares

Marc Saltel<sup>1</sup>, Bernard Lavielle<sup>2</sup>, Bertrand Thomas<sup>2</sup>, Romain Rebeix<sup>2</sup>, Michel Franceschi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Pessac

<sup>2</sup>Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan

<sup>3</sup>Géoressources et Environnement, Pessac

Réalisé dans le cadre d'un partenariat entre laboratoires universitaires (ENSEGID et CENBG), et le BRGM d'autre part et financé avec le

soutien du Conseil Général de Gironde et de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, ce travail vise à améliorer la connaissance des systèmes aquifères du nord du Bassin aquitain. Au total 36 nouveaux points ont été prélevés dans les nappes du Miocène, de l'Oligocène, de l'Éocène, du Campanien, du Cénomaniens et du Jurassique. Les cations et anions majeurs, et éléments traces, les isotopes stables de l'eau (18O, 2H) et les isotopes du carbone (14C et 13C) ont été analysés sur la totalité des échantillons, dans le but d'acquérir de nouvelles données dans des secteurs peu ou pas étudiés avec ces outils. Ces mesures viennent enrichir les données déjà disponibles issues de la littérature.

C'est ainsi 127 mesures d'activité en 14C avec les mesures de 13C correspondantes qui ont pu être utilisées pour recalculer des temps de résidence. Nous disposons également de 152 mesures sur les isotopes de l'eau (18O et 2H). Les résultats montrent des temps de résidence élevés déterminés par le 14C pour les eaux les plus appauvries en 18O et 2H. L'absence de période de recharge liée à la mise en place d'un pergélisol continu lors du dernier Maximum Glaciaire a été mis en évidence par de nombreux auteurs dans des régions de l'Europe du Nord, or en Aquitaine cette absence de recharge n'est pas clairement identifiée.

Les mesures de gaz rares (Ne, Ar, Kr, Xe) ont permis une détermination des paléotempératures lors de la recharge des eaux dans 13 prélèvements d'eau couvrant des temps de résidence allant de 3 000 ans (BP) à 32 000 ans (BP). Ces mesures mettent en évidence au maximum glaciaire, il y a environ 20 000 ans, un écart de température de l'ordre de 5,7°C par rapport à l'actuel. Ces températures ne permettent pas la mise en place d'un pergélisol continu qui agit comme un imperméable qui empêche la recharge et redirige les écoulements.

### 9.1.5 (o) Identification géochimique et isotopique des processus hydrogéologiques au sein de l'aquifère littoral de Bonifacio (Corse-du-Sud)

Sébastien Santoni<sup>1</sup>, Emilie Garel<sup>1</sup>, Jessy Jaunat<sup>1</sup>, Frederic Huneau<sup>1</sup>, Thierry Labasque<sup>2</sup>, Virginie Vergnaud-Ayraud<sup>2</sup>, Luc Aquilina<sup>2</sup>, Adriano Mayer<sup>3</sup>, Olivier Radakovitch<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Hydrogéologie, Corte, France

<sup>2</sup>Géosciences Rennes

<sup>3</sup>EMMAH, Avignon

<sup>4</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

L'extrême-sud de la Corse fait face à des difficultés croissantes pour satisfaire ses besoins en eau potable, particulièrement en juillet-août. La commune de Bonifacio (Corse-du-Sud) doit accueillir un afflux touristique d'environ un million de visiteurs par an, pour un territoire de 25 km<sup>2</sup> et seulement 3 000 résidents permanents. Les eaux souterraines de l'aquifère carbonaté miocène du causse de Bonifacio constituent la seule ressource alternative permettant de diversifier et de sécuriser sur le long terme l'alimentation en eau potable de la commune, notamment en été.

La ressource est cependant mal connue, exploitée de façon très marginale et non coordonnée. Le manque d'éléments d'arbitrage risque d'être rapidement dommageable pour sa gestion durable et engendre déjà des conflits d'usages.

L'objectif de l'étude est de clarifier l'état qualitatif de l'aquifère, de déterminer le potentiel quantitatif, d'évaluer les temps de séjour et d'identifier les processus de recharge ainsi que les conditions aux limites.

Des outils de l'hydrogéologie isotopique (18O, 2H, 3H, 13C, 222Rn et 223,224Ra) et géochimique (ions majeurs, traces, CFCs et SF6) sont utilisés mensuellement ou ponctuellement sur un réseau de suivi comportant 3 sources, 2 ruisseaux, 6 puits et 17 forages, dont un traversant la quasi-totalité des 300 m d'épaisseur de sédiments.

Les premiers résultats montrent que la minéralisation des eaux souterraines est influencée majoritairement par les embruns puis par la disso-

lution des carbonates. Les gaz anthropiques mettent en évidence deux niveaux aquifères superposés. Un niveau supérieur, dont la composante principale est une eau actuelle issue de l'infiltration verticale directe de la pluie et un niveau inférieur, composé d'eau ancienne originaire du substratum granitique fracturé environnant et sous-jacent. Les isotopes du radon et du radium montrent de faibles sorties d'eau douce en mer, localisées au débouché littoral des vallées.

### 9.1.6 (o) Use of hydrochemistry and isotopes to delineate groundwater flow patterns in the Mogher Al Mer area (Damascus Basin, Southwestern Syria)

Nazeer Asmael<sup>1,2</sup>, Alain Dupuy<sup>2</sup>, Philippe Le Coustumer<sup>2</sup>, Frédéric Huneau<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Damascus University, Department of Geology, Syria - Syrie

<sup>2</sup>Géoresources & Environnement, Pessac

<sup>3</sup>Université de Corse Pascal Paoli, Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire d'Hydrogéologie, Corte

The hydrochemical characteristic and stable isotopes of groundwater from Mogher Al Mer area, located in southwestern Syria; has been used as a tools to identify and assess the main features of its hydrogeological system. In this arid region, groundwater is considered to be as a main source of water supply for both drinking and irrigation purposes. The detailed description of hydrogeochemical conditions, including major ions, physico-chemical and in situ field parameters, has underlined the very complex variability of the stratigraphic sequences and hence the numerous hydrogeological units within the study area. Groundwater chemical signature is found to be controlled by the water-rock interaction processes in the mountainous western part of the study area and the vertical flow trend is dominated. On the other hand, an anthropogenic influences are observed in the plain eastern part and the horizontal flow is noted. The isotopic characteristics of groundwater implies that a significant and rapid infiltration of atmospheric precipitation taking place before the evaporation; Hence the aquifer system recharges mainly by the infiltration of meteoric water. In general, the region can be considered as a part of the main intermediate or even regional flow system instead of a local one.

The hydrogeochemical and isotopes characteristics did not give enough evidences to interpret the groundwater flow behavior in the target area; Nevertheless, the beginning creation of quantitative hydrogeological model might add a better understanding of regional hydrogeological settings in this complex aquifers system for better water resources management strategy.

### 9.1.7 (p) Caractérisation isotopique et géochimique des circuits thermo-minéraux de la Corse orientale : définition des impluviums et origine des minéralisations soufrées

Aude Giacomini<sup>1</sup>, Frederic Huneau<sup>1</sup>, Emilie Garel<sup>1</sup>, Jessy Jaunat<sup>1</sup>, Sébastien Santoni<sup>1</sup>, Helene Celle-Jeanton<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Hydrogéologie, Corte, France

<sup>2</sup>LMV, Clermont-Ferrand

La diversité géologique et la complexité structurelle de la Corse, couplées à un cadre hydroclimatique favorable, définissent des conditions hydrogéologiques propices au développement de nombreux circuits thermo-minéraux. Parmi ceux-ci, les émergences de la plaine orientale se distinguent par leurs caractéristiques thermales et leur minéralisation riche en sulfates et en hydrogène sulfuré. Même si certains sites sont

déjà utilisés et valorisés dans le cadre d'activités thermales, le niveau de connaissance hydrogéologique et géochimique est encore insuffisant pour garantir un développement viable de ces activités.

8 sources individuelles ou bassins sourciers ont été sélectionnés dans le secteur de la plaine orientale et du Fium'Orbu (Pietrapola, Fontanella, Aquacetosa, Vignola, Vadina, Puzichello, Campo Favajo, Fajo-Quarcio). Un suivi à pas de temps régulier a permis d'observer l'évolution des paramètres physico-chimiques de terrain, des ions majeurs et des éléments traces métalliques. Les isotopes stables de la molécule d'eau (oxygène-18 et deutérium), le carbone-14, le soufre-34 et l'oxygène-18 des sulfates ainsi que le soufre-34 de l'hydrogène sulfuré ont également été dosés. Cette caractérisation isotopique a pour objectif de préciser la localisation des zones de recharge des aquifères, d'estimer les temps de séjour dans le sous-sol et d'identifier l'origine des différentes espèces sulfurées.

Les résultats confirment une origine commune pour les eaux sulfatées-calciques de la plaine sédimentaire orientale avec une composante profonde minoritaire en provenance des contreforts schisteux et une composante majoritaire fortement influencée par la remontée du circuit géothermal au travers des terrains sédimentaires. Les eaux sulfurées-sodiques du bassin sourcier de Pietrapola sont caractérisées par une forte inertie au sein des granodiorites hôtes et par une recharge longue distance du circuit géothermal en provenance des hauts reliefs de la chaîne montagneuse centrale.

### 9.1.8 (p) Variabilité temporelle et spatiale des isotopes stables de la molécule d'eau dans le bassin de l'Ebre, Espagne

Philippe Negrel<sup>1</sup>, Emmanuelle Petelet-Giraud<sup>1</sup>, Romain Millot<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

L'Ebre, un des principaux fleuves de la péninsule ibérique, se singularise par sa forte minéralisation (TDS = 450-1350 mg/L) correspondant notamment à des concentrations élevées en sulfates, Ca, Na et Cl. Dans le cadre de cette étude, les eaux de l'Ebre et de ses principaux affluents ont été échantillonnées afin d'identifier et de caractériser le cycle de l'eau (rivières, nappes) induit par le milieu naturel (recharge) et les activités humaines (occupation des sols et irrigation, barrages). L'objectif principal est de déchiffrer, dans le temps et dans l'espace, l'origine de l'eau du fleuve afin d'améliorer la connaissance des facteurs potentiellement impactant et dans la perspective d'une meilleure gestion des ressources en eau sur le bassin versant. Ont été utilisés pour cette étude la composition isotopique  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^2\text{H}$  de la molécule d'eau des différents affluents de l'Ebre, du suivi temporel du fleuve à l'exutoire de son bassin versant ainsi que celle de l'entrant météorique via différentes stations de mesure des pluies sur le bassin.

Les affluents présentent de grandes variations dans leurs signatures isotopiques, un seul a un signal évaporé tandis que les valeurs les plus appauvries sont observées pour les affluents qui drainent les Pyrénées. L'Ebre, d'amont en aval, a des valeurs isotopiques dans la même gamme que les affluents et ces valeurs reflètent les entrées de pluie appauvries, les apports des Pyrénées et les entrées de pluie méditerranéennes plus enrichies. Les variations temporelles à l'exutoire du fleuve ont la même gamme en  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^2\text{H}$  que les variations d'amont en aval, sans aucun lien avec le débit du fleuve, ni avec la teneur en Cl.

L'excès en deutérium ( $D\text{-ex} = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$ ) est comparé avec les valeurs en chlorure de chaque zone climatique pour l'Ebre d'amont en aval et pour le suivi temporel du fleuve à l'exutoire de son bassin versant. Ces comparaisons mettent en évidence un rôle majoritaire des eaux souterraines au travers des ajustements log (amont-aval) ou hystérésis (suivi à l'exutoire), reflétant ainsi la retenue des eaux de ruissellement par les barrages et le soutien « anormal » au débit du fleuve par les eaux souterraines en hiver. Les outils isotopiques montrent ici toute leur pertinence

à assister les gestionnaires dans leurs démarches de définition de mesures environnementales et de gestion des bassins fluviaux notamment pour préserver/restaurer l'état des écosystèmes aquatiques.

### 9.1.9 (p) Caractérisation du standard d'eau de rivière SLRS-5 (NRC-CNRC) compilation interlaboratoire du silicium, des terres rares et de 21 autres éléments en trace

Delphine Yeghicheyan<sup>1</sup>, Cécile Bossy<sup>2</sup>, Martine Bouhnik-Le Coz<sup>3</sup>, Chantal Douchet<sup>4</sup>, Guy Granier<sup>5</sup>, Alexie Heimburger<sup>6</sup>, François Lacan<sup>7</sup>, Aurélie Lanzaova<sup>8</sup>, Tristan C.C. Rousseau<sup>8</sup>, Jean-Luc Seidel<sup>9</sup>, Mickael Tharaud<sup>10</sup>, Frédéric Candaudap<sup>8</sup>, Jérôme Chmeleff<sup>8</sup>, Christophe Cloquet<sup>1</sup>, Sophie Delpoux<sup>9</sup>, Marie Labatut<sup>7</sup>, Rémi Losno<sup>6</sup>, Catherine Pradoux<sup>7</sup>, Yann Sivry<sup>10</sup>, Jeroen E. Sonke<sup>8</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

<sup>2</sup>EPOC, Talence

<sup>3</sup>Géosciences Rennes

<sup>4</sup>Géosciences Montpellier

<sup>5</sup>CEA, Bagnols-sur-Cèze

<sup>6</sup>LISA, Créteil

<sup>7</sup>LEGOS, Toulouse

<sup>8</sup>GET, Toulouse

<sup>9</sup>HydroSciences Montpellier

<sup>10</sup>IPG Paris

Le standard d'eau de rivière naturelle SLRS-5 (NRC-CNRC) est une référence de contrôle qualité en analyse d'eau de routine pour la communauté internationale. Dix laboratoires français étudiant les éléments majeurs et en trace dans les solutions naturelles (groupe de travail de l'atelier du CNRS « Isotrace ») valident leurs mesures avec les 19 éléments certifiés par le producteur. Or, d'autres éléments non certifiés sont régulièrement analysés par ces laboratoires qui ont comparé et compilé 2 années de leurs mesures sur ce standard d'eau. La plupart des mesures sont réalisées par ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry).

Dans un premier temps, il a été vérifié que les résultats obtenus étaient cohérents pour les éléments certifiés par le producteur. Ainsi Ba présente une valeur compilée de  $14,2 \pm 1,4 \mu\text{g/l}$  (330 mesures issues de 9 laboratoires participants) en accord avec la valeur certifiée de  $14 \pm 0,5 \mu\text{g/l}$ .

Ensuite, des valeurs moyennes et leurs incertitudes associées sont proposées pour des éléments non certifiés par NRC-CNRC tels que le silicium et 35 éléments en trace (terres rares, Ag, B, Bi, Cs, Ga, Ge, Li, Nb, P, Rb, Rh, Re, S, Sc, Sn, Th, Ti, Tl, W, Y et Zr). Le rapport isotopique de Sr est aussi proposé à partir de mesures par TIMS (Thermo Ionisation Mass Spectrometry).

Il apparaît que les mesures individuelles et compilées varient de quelques ng/l à 2400  $\mu\text{g/l}$  avec des incertitudes associées comprises entre 2 et 240%. Les fortes incertitudes associées ne sont pas proportionnelles aux concentrations puisque certaines mesures s'accordent même à de faibles teneurs tels que Bi ( $0,9 \pm 0,3 \text{ ng/l}$  valeur compilée). Dans certains cas, un ou deux laboratoires ont caractérisé l'élément impliquant moins de mesures et une incertitude associée plus élevée quelle que soit la concentration en l'élément. C'est le cas, par exemple, de Ge ( $0,015 \pm 0,014 \mu\text{g/l}$  valeur compilée) caractérisé par seulement 2 laboratoires (34 mesures) et de P ( $8,19 \pm 3,40 \mu\text{g/l}$ ) issu de 8 mesures d'un seul laboratoire. Les terres rares et onze autres éléments (B, Bi, Cs, Li, Rb, Si, Th, Ti, Tl, Y et Zr) ont été déterminés par au moins 3 laboratoires différents et apportent des informations complémentaires essentielles à l'utilisation du standard d'eau SLRS-5 dans le domaine des Géosciences.

## 9.2 Hydrogéologie quantitative (CNFGG)

### Responsables :

- Alain Dupuy (ENSEGID, Bordeaux)  
alain.dupuy@ensegid.fr
- Alexandre Pryet (ENSEGID, Bordeaux)  
alexandre.pryet@ensegid.fr

### Résumé :

Ce thème dédié à l'hydrogéologie quantitative est consacré aux travaux théoriques et pratiques qui visent à caractériser la ressource en eau souterraine pour répondre aux problématiques de gestion durable. Il sera question du développement méthodologique et de l'exploitation de modèles hydrodynamiques et hydrodispersifs pour des systèmes géologiques complexes (systèmes sédimentaires multicouches, milieux fissurés). On s'intéressera aux développements récents associés à la gestion des conditions limites (drainance verticale, recharge, interaction nappe-rivière) ainsi qu'aux problématiques liées à la calibration des paramètres et à la gestion des incertitudes.

### 9.2.1 (o) Caractérisation du dénoyage d'un aquifère - Approche au puits - Exemple du réservoir de l'Oligocène au sud de l'agglomération bordelaise

Marc Saltel<sup>1</sup>, Benoit Dewandel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Pessac

<sup>2</sup>BRGM, Montpellier

Le forage de Moulin Lagus (08276X0090), situé au sud de l'agglomération bordelaise sur la commune de Saucats, est exploité depuis les années 70 pour l'alimentation en eau potable. Il fait partie du champ captant de la ligne des « 100 000 m<sup>3</sup>/j » correspondant à un ensemble de forages captant les calcaires fissurés et karstifiés de l'Oligocène. Au fil des ans, le niveau statique a progressivement diminué pour passer sous la couverture argileuse chattienne au milieu des années 90. Depuis, la baisse des niveaux piézométrique a fortement ralenti malgré des pompages plus importants. Se pose donc la question d'un changement du comportement hydrodynamique de l'aquifère lié à l'éventuel changement d'état du système : passage d'un aquifère captif à libre. Afin de répondre à cette question, l'ensemble des tests par pompage disponibles sur le forage ont été ré-analysés et modélisés. Les essais par paliers réalisés en 1996 et 2005 ont permis d'évaluer les pertes de charge quadratiques liées au puits. Les essais de pompage de longue durée réalisés en 1970, 1996, 2005 et 2008 ont été revus en réalisant un diagnostic basé sur l'interprétation de la courbe de dérivée logarithmique des rabattements.

Les pompages d'essai qui ont été conduits mettent clairement en évidence un changement d'état des conditions de l'aquifère lié à la surexploitation du secteur. De 1970 à environ 1994-1995, le niveau d'eau dans l'ouvrage était situé au-dessus des formations imperméables du Chattien. Durant cette période, l'aquifère capté était captif. A partir de 1995, le niveau est situé sous l'imperméable a mis progressivement l'aquifère en condition libre. Ceci a pu être vérifié à partir de la modélisation des essais, où le seul paramètre changeant entre ces deux états est l'emmagasinement de l'aquifère, passant de 5x10<sup>-4</sup> à 10% à partir de 1995.

Ces résultats vont être confrontés à de nouveaux tests afin d'évaluer plus précisément le coefficient d'emmagasinement de la nappe.

### 9.2.2 (o) Apport de l'étude de la fracturation et de la karstification dans la modélisation des aquifères karstiques

Chloé Poulin<sup>1</sup>, Severin Pistre<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hydrosciences Montpellier

Le comportement des aquifères karstiques à long terme ne peut être estimé qu'au travers de l'utilisation de modèles qui permettent de modéliser la réponse et le stockage d'eau de ces aquifères. Une bonne connaissance de la structure de ces aquifères fortement hétérogènes est primordiale afin de mettre en oeuvre des modèles robustes d'exploitation durable de la ressource. Nous proposons une approche qui associe l'analyse de la fracturation à plusieurs échelles (de micro à meso) à celle du contexte géomorphologique, afin de déterminer les axes préférentiels d'écoulements au sein d'aquifères karstiques. Ces axes préférentiels d'écoulements peuvent ensuite être intégrés à des modèles, afin de prévoir au mieux, le comportement hydrodynamique de ces aquifères. Cette approche a été appliquée au karst dit de Bourbouillet (sud Ardèche, France), afin d'évaluer les possibilités de captages. Les résultats, associés à ceux issus des méthodes hydrochimiques et des tests de traçages, permettent de proposer un modèle de gestion de cet aquifère.

### 9.2.3 (o) Unexpected behavior of Cr51-EDTA used as a tracer in an innovative field experiment during the infiltration of water in a bank of the Rhône River (Crépieux Charmy well field - 69)

Alain Bourg<sup>1</sup>, Daniel Getto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Géoressources et Environnement, Université de Pau et des Pays de l'Adour

<sup>2</sup>CEA Grenoble

Les champs captants en nappe alluviale subissent une recharge significative par l'eau de la rivière qui s'infiltré à travers les berges voisines. La berge et les sédiments de l'aquifère sont censé apporter un effet filtre. Pour tester la validité de cette épuration naturelle vis-à-vis des métaux lourds nous avons mis en place une expérimentation de terrain originale. Des colonnes in situ ont été mises en place sous la forme de tubes enfoncés dans la berge du Rhône. Des solutions radioactives ont été injecté dans des tubes différents (Le Zn65 et le Hg203, tous les deux sous forme de chlorure, le Cr51 sous forme de chromate et le complexe Cr51-EDTA comme traceur). A côté de chaque tube on a foncé un tube, vide cette fois, dans lequel on pouvait faire circuler un détecteur de rayons gamma à intervalles de temps choisis afin de suivre le déplacement de ces radionucléides.

Pour le CrEDTA classiquement utilisé comme traceur, nous avons observé un déplacement de 90 cm en 4 mois, mais avec un comportement pour le moins étrange. En effet plus le pic de Cr51 avance dans la berge, moins il est dispersé. Une hypothèse est proposée pour expliquer cette observation.

### 9.2.4 (o) Caractérisation et modélisation des échanges nappe-rivière. Application au champ captant de Saint Médard en Jalles (Gironde, France)

Yohann Cousquer<sup>1,2</sup>, Alain Dupuy<sup>1</sup>, Alexandre Pryet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géoressources & Environnement, Pessac

<sup>2</sup>LyRELYonnaise des Eaux, Talence

Les échanges nappe-rivière jouent un rôle prépondérant dans le fonctionnement des hydrosystèmes tant en termes quantitatifs (soutient des étiages, débordement de crues) qu'en termes qualitatifs (transport de polluant d'origines agricoles ou industrielles). Le champ captant de Saint Médard en Jalles a été choisi comme cas d'étude des échanges nappe-rivière dans un contexte de pollution d'une nappe en relation avec un cours d'eau. Le développement d'un modèle numérique en différences finies, à l'échelle du champ captant est utilisé ici comme outil de caractérisation des échanges nappe rivière, avec pour objectif la quantification des volumes échangés, et l'étude du transfert de masse entre la rivière et la nappe. Préliminairement à cette modélisation, et dans un souci d'amélioration de la représentation d'un cours d'eau dans un modèle hydrogéologique, un modèle conceptuel représentant une section 2D verticale d'un aquifère traversée par un cours d'eau, a été réalisé à l'aide du code de calcul en éléments finis SUTRA (le maillage permet de mieux décrire la géométrie d'une rivière), afin de réaliser une analyse de sensibilité des différents paramètres contrôlant les débits échangés à l'interface nappe-rivière. Ces résultats, intégrés dans le modèle à l'échelle de la zone d'étude, permettent une quantification des débits échangés plus précis, et une étude des modalités d'échange plus rigoureuse à l'échelle de l'interface nappe-rivière.

### 9.2.5 (o) Sismologie de l'environnement : Suivi des changements de la nappe phréatique par corrélation de bruit ambiant

Christophe Voisin<sup>1</sup>, Stéphane Garambois<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

La corrélation quotidienne des enregistrements continus de bruit sismique peut révéler des variations de la vitesse sismique de propagation des ondes entre les paires de capteurs sismologiques avec une résolution inédite jusqu'alors. Nous nous concentrons ici sur un ensemble de données sismologiques acquises à Utiku (Nouvelle-Zélande) sur un glissement gravitaire, au pied duquel serpente une rivière. Nous montrons que les changements de vitesse sismiques présentent une variation annuelle primaire, ainsi que des fluctuations secondaires avec des périodes de 2 mois et de 15 jours, respectivement. Une comparaison avec les données piézométriques colocalisées nous permet de relier ces variations de vitesse sismique avec les variations piézométriques du niveau de la nappe phréatique. La même analyse réalisée sur les différentes paires de capteurs sismiques nous permet de suivre le transfert de l'eau souterraine à l'intérieur du versant.

### 9.2.6 (o) Investigation des aquifères des roches volcaniques par l'aérogéophysique dans le nord-ouest algérien

Karim Allek<sup>1</sup>, Abderrahmane Bouguern<sup>1</sup>, Djamel Boubaya<sup>2</sup>, Mohamed Hamoudi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LABOPHYT, Boumerdes, Algérie

<sup>2</sup>Université de Tebessa, Algérie

<sup>3</sup>USTHB Bab Ezzouar, Algérie

L'alimentation en eau de la région du Nord-ouest algérien, à proximité de la frontière algéro-marocaine, pose problème eu égard à la rareté de la ressource en eau. Le captage des eaux souterraines par la réalisation de puits et de forages peut résoudre efficacement le problème. Quelques ouvrages ont permis de reconnaître l'importance hydrogéologique des coulées volcaniques plio-quadernaires présentes dans la région qui forment un système de collecteurs particulièrement perméables alimentées principalement à partir d'un arrière-pays calcaire. La complexité et surtout la nature discontinue de ce type d'aquifère fait que les méthodes classiques de prospection s'avèrent coûteuses d'un point de vue financier (matériel de forage, compétences diverses,...) et en temps. Les données aérogéophysiques existantes (particulièrement aéromagnétiques) et qui couvrent l'ensemble de la région offrent une alternative intéressante pour améliorer notre connaissance de ces aquifères et de mieux relever les limites diffuses des roches volcaniques et de préciser leur épaisseur et continuité.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'applicabilité de la méthode aéromagnétique, à la cartographie des formations volcaniques aquifères par la précision de leur contact avec les marnes imperméables du Miocène et, éventuellement avec les calcaires sous-jacents du Lias. La confrontation des données de forages, de la géologie et des résultats de la prospection électrique avec l'information aéromagnétique a permis de vérifier les différentes signatures géophysiques des formations volcaniques visibles en affleurement. Certaines anomalies, de part leur signatures magnétiques assez caractéristiques, semblent être en relation avec l'existence de coulées volcaniques sous la couverture quaternaire et les dépôts alluvionnaires récents.

### 9.2.7 (o) Utilisation du modèle hydrodynamique des nappes du Jurassique de Poitou-Charentes pour la gestion de l'irrigation : simulation des projets de stockage d'eau

Francis Bichot<sup>1</sup>, Olivier Douez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Saint-Benoit

En région Poitou-Charentes les nappes sont très sollicitées pour l'irrigation, avec des prélèvements annuels de l'ordre de 200 Mm<sup>3</sup>. Les années successives de sécheresse (2003, 2005...) ont mis en exergue de fortes problématiques sur la ressource en eau avec l'impact important de l'irrigation sur le débit des cours d'eau avec des centaines de kilomètres asséchés. Cette prise de conscience a entraîné la réduction des volumes autorisés par l'administration et la recherche par la profession agricole de solutions à travers des programmes collectifs de retenues remplies en hiver par des forages qui ne sont plus ou partiellement utilisés en été.

Le BRGM ayant mis au point en partenariat avec la Région, les 2 Agences de l'eau (Loire-Bretagne et Adour-Garonne) et la DREAL, un modèle hydrodynamique régional des nappes du Jurassique, les maîtres d'ouvrage ont souhaité tester leurs projets de stockage avec ce modèle pour voir l'impact des remplissages en hiver et des économies d'eau au printemps et en été. Ces projets testés correspondent à plusieurs dizaines de millions de m<sup>3</sup> stockés provenant des nappes du Jurassique (Jurassique supérieur fracturé, Dogger et Infra-Toarcien) et intéressent la plupart des bassins : Lay, Vendée, Sèvre-Niortaise, Curé, Boutonne, Clain.

Le modèle comporte 8 couches dont 3 principaux aquifères et s'étend de Châtellerault au nord (Bassin Parisien) à Angoulême au sud (Bassin Aquitain). Développé sous MARTHE à la maille kilométrique, il est calé de 2000 à 2011 au pas de temps mensuel à hebdomadaire (mai à août) et intègre plus de 3000 km de cours d'eau et plus de 4000 points de prélèvement. Ainsi, l'impact des projets de retenues sur le débit des cours d'eau a notamment été évalué et a conduit parfois à modifier les projets (position des retenues, période de remplissage, forages substitués...). Le modèle montre ici l'intérêt de disposer de ce type d'outil de référence découlant d'un important travail d'intégration de données régulièrement mises à jour.

### 9.2.8 (o) Gestion durable des eaux souterraines dans les systèmes sédimentaires multicouches : problématique de l'estimation de la recharge

Hugo Delottier<sup>1</sup>, Alain Dupuy<sup>1</sup>, Alexandre Pryet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEORESSOURCES ET ENVIRONNEMENT, Pessac

Dans l'objectif de rationaliser l'utilisation de la ressource en eau souterraine, le concept de débit d'exploitation durable est largement utilisé depuis le 20<sup>ème</sup> siècle et se base en partie sur la recharge des aquifères. Cette notion de rationalisation des usages des ressources en eau souterraine est d'autant plus prégnante que le contexte du changement climatique s'impose.

La recharge des systèmes aquifères est un phénomène dont les paramètres sont nombreux, multiples et souvent estimés avec des incertitudes parfois importantes.

Afin d'étudier les conséquences de ces incertitudes sur l'estimation de la recharge, un modèle de fonctionnement heuristique a été mis en place basé sur un bassin versant hydrogéologique synthétique. Des chroniques théoriques observées ont été générées avec des modèles largement utilisés pour le calcul de la recharge. Les paramètres des modèles hydrogéologiques (transmissivité ; emmagasinement et recharge) sont contrôlés et fixés a priori.

L'outil d'optimisation PEST (Parameter ESTimation) et les chroniques théoriques observées y sont ensuite utilisées pour calibrer de nouveaux modèles hydrogéologiques en fonction des paramètres hydrodynamiques et de la recharge : cette phase permet de simuler par estimation numérique une recharge potentielle associée à un jeu de paramètres hydrodynamiques.

Cette démarche vise à évaluer et quantifier l'incertitude sur les valeurs de flux de recharge issues de modèles de fonctionnement hydrogéologique.

Au final, les conséquences de ces incertitudes sur ces modèles de gestion seront évaluées et discutées quantitativement et qualitativement.

### 9.2.9 (o) RichardsFOAM : un solveur massivement parallèle pour l'équation de Richards

Laurent Orgogozo<sup>1</sup>, Nicolas Renon<sup>2</sup>, Cyprien Soullain<sup>3</sup>, Florent Hénon<sup>3</sup>, Sat Kumar Tomer<sup>4</sup>, David Labat<sup>1</sup>, Oleg S. Pokrovsky<sup>1</sup>, Muddu Sekhar<sup>5</sup>, Rachid Ababou<sup>3</sup>, Michel Quintard<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Calculs en Midi-Pyrénées, Toulouse

<sup>3</sup>IMFT, Toulouse

<sup>4</sup>Centre d'études spatiales de la biosphère, Toulouse

<sup>5</sup>Indian Institute of Science, Bangalore, Inde

Les infiltrations d'eaux météoriques à travers les sols constituent un processus déterminant dans de nombreuses applications (eau, environnement, géotechnique, ...) ainsi que dans de nombreux phénomènes naturels, comme par exemple l'altération des surfaces continentales (e.g. : Goddérès et al., 2012), processus clé du cycle du carbone (Walker et al., 1981). Une manière classique de quantifier ces écoulements en milieu poreux variablement saturés consiste en la résolution numérique de l'équation de Richards, tridimensionnelle, instationnaire et non-linéaire (Richards, 1931). Néanmoins, l'étude des migrations d'eau dans les sols en conditions évolutives (en terme d'occupation des sols et de climat par exemple) requiert des modélisations à grandes échelles spatiales (km<sup>2</sup> et plus) et temporelles (décades, siècle). L'usage du calcul massivement parallèle est le moyen principal de traiter de tels problèmes de grandes tailles (voir par exemple Miller et al., 2013).

Nous présentons un ici solveur massivement parallèle pour l'équation de Richards, le solveur RichardsFOAM. Ce solveur a été développé dans le cadre de la boîte à outils libre de droit de mécanique des fluides numérique OpenFOAM®. RichardsFOAM est capable de traiter des problèmes de grandes tailles grâce aux bonnes performances parallèles d'OpenFOAM® (avec RichardsFOAM, environ 90% d'efficacité parallèle avec 1024 coeurs en scalabilité forte comme en scalabilité faible). Ces performances nous permettront de proposer des modélisations mécanistiques des flux d'eau aux échelles spatio-temporelles caractéristiques de l'étude de l'altération des surfaces continentales (km carré, siècle).

Une étude détaillée des performances parallèles de RichardsFOAM sera présentée (scalabilité forte et faible, impact des entrées/sorties et de la raideur numérique du problème considéré), ainsi qu'un exemple d'application à un jeu de données de terrain. Les perspectives scientifiques associées seront discutées.

### 9.2.10 (o) Les anciennes mines lorraines de charbon, réservoir géothermique du futur ? Modélisation 3D du bassin houiller lorrain

Pauline Collon-Drouaillet<sup>1</sup>, Jeanne Pellerin<sup>1</sup>, Wendy Steckiewicz-Laurent<sup>1</sup>, Laurent Vaute<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GeoRessources, Nancy

Avec une température allant jusqu'à 59°C à 1200m de profondeur, les mines lorraines de charbon vont peut-être trouver un nouvel usage : la production d'énergie géothermique basse-température. Mais avant de mettre en place ce « détournement géothermique » des anciennes mines, la faisabilité du projet doit être soigneusement étudiée.

Des simulations préliminaires ont permis d'identifier la mine de Merlebach comme le site le plus favorable à l'exploitation. Les réseaux de galeries existants facilitent la circulation des fluides mais peuvent aussi générer des courts-circuits diminuant le rendement de l'installation. Il est donc essentiel de bien caractériser la géométrie tridimensionnelle du système dans le modèle d'écoulement final.

Un premier modèle structural surfacique comportant 13 failles et 2 horizons est construit par une approche classique « explicite ». Les 81 veines de charbons, sub-verticales, espacées de 5 à 10m et recoupées par les failles et la formation Permienne sus-jacente sont modélisées grâce à une approche originale de modélisation « implicite ». Les surfaces extraites de ce modèle implicite sont ensuite remaillées grâce à une technologie nouvelle basée sur les diagrammes de Voronoi et développée spécifiquement pour les modèles géologiques. Sur ces surfaces sont ensuite distinguées les parties exploitées, qui ont fait l'objet d'un remplissage par du sable et ont donc une très grande perméabilité, des parties non-exploitées, peu perméables. Les infrastructures minières, qui constituent des drains, sont modélisées comme objet « courbe ». Le modèle géométrique final, indépendant de la discrétisation volumique choisie, permet donc de distinguer : les drains qui constituent les infrastructures, les failles, les parties exploitées et non-exploitées des 81 veines de charbons, la formation gréseuse encaissante du charbon et la couverture permienne.

Ce modèle est ensuite rasterisé en grille volumique selon les spécifications du simulateur d'écoulement choisi.

### 9.2.11 (o) Exploitation géothermique d'un système sédimentaire profond par doublet : premières modélisations et étude de sensibilité

Morgan Le Lous<sup>1,2</sup>, Alain Dupuy<sup>1</sup>, François Larroque<sup>1</sup>, Adeline Moignard<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GEORESSOURCES ET ENVIRONNEMENT, Pessac

<sup>2</sup>Fonroche Géothermie, Pau

L'exploitation des ressources géothermiques profondes est un enjeu. Les bassins sédimentaires constituent des cibles potentielles particulièrement prometteuses. Parmi les solutions techniques, le doublet géothermique apparaît adapté à la production d'un flux de chaleur en surface valorisable. L'optimisation de tels systèmes nécessite toutefois de gérer le dispositif technique et ses interactions avec son environnement. Dans cette optique, un modèle numérique représentatif d'un doublet géothermique est réalisé à partir du code de calcul FEFLOW. Les variables d'état du système étudiées dans cette première phase sont la température ainsi que la charge hydraulique, calculées au sein d'un réservoir homogène. Une analyse de sensibilité est menée sur les différents paramètres physiques caractérisant le réservoir géothermique.

L'objectif est de définir les paramètres clés, ainsi que d'appréhender au mieux les conséquences possibles d'incertitudes portant sur la définition des propriétés physiques du réservoir, mais également la disposition géométrique du dispositif d'exploitation ainsi que ses modalités d'exploitation (débit de soutirage/injection).

Les principaux résultats ont permis de distinguer le rôle fondamental de certains paramètres dans l'établissement de la température du réservoir, de la dynamique de propagation de la bulle froide le long de l'axe du doublet, ou encore de la variation des pressions rencontrées aux puits de production et d'injection.

### 9.2.12 (p) La problématique des barrages souterrains dans le sud de l'Algérie. cas du barrage inferoflux de Ouled Djellal

Bachir Benlaoukli<sup>1</sup>

<sup>1</sup> MVRE (ENSH) ENSH BLIDA ALGERIE - Algérie

Pour une agriculture d'auto subsistance, surtout l'abreuvement des troupeaux ovins, le secteur de l'hydraulique veut se doter d'une importante infrastructure de mobilisation de la ressource en eau en termes de réalisation de barrages souterrains dans le sud du pays. Seulement, les concepteurs n'ayant pas une grande expérience dans ce domaine se sont heurtés à des problèmes d'ordre dimensionnel, dans la conception du gabarit et le choix du type d'ouvrage à envisager pour des conditions climatiques et géologiques particulières assez complexes en général, nécessitant la prise en compte notamment la lithologie précédant le substratum, et la disponibilité des matériaux de construction souvent rares dans ces régions relativement arides.

Ces ouvrages réalisés au niveau des grands cours d'eau du sud appartenant à la catégorie des grands oueds secs durant presque toute l'année et la crue lorsqu'elle se présente, elle est dévastatrice. Une grande partie de ces eaux écoulées dans l'oued pénètre dans le sous sol pour former ainsi une nappe phréatique considérable. Le barrage souterrain sert à améliorer les disponibilités en eau souterraines dans la vallée en empêchant la vidange naturelle de la nappe.

La Direction d'Hydraulique de la Wilaya de Biskra a envisagé une étude d'un barrage inféroflux dont l'objectif est de chercher la meilleure solution pour endiguer le chemin d'écoulement souterrain. Notre travail sert à contribuer dans la découverte de la meilleure conception, prenant en considération toutes les conditions et contraintes de la région. Une analyse approfondie des variantes possibles, a permis de découvrir des alternatives qui se sont imposées d'elles mêmes. Par exemple le choix de l'exutoire se fait différemment que pour les ouvrages superficiels. Pour cerner cette problématique très complexe dans la conception de ces ouvrages, le barrage souterrain sur oued JDI à Ouled Djellal a servi de base d'étude.

Ce travail consiste à étudier les questions qui préoccupent les concepteurs de tels ouvrages.

### 9.2.13 (p) Modélisation semi-distribuée des temps de séjours pour l'évaluation de la qualité des eaux souterraines en Beauce

Nicolas Peyraube<sup>1</sup>, Stéphane Binet<sup>1,2</sup>, Emélie Viel<sup>1</sup>, Hervé Noël<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Orléans

<sup>2</sup>EcoLab, Toulouse

<sup>3</sup>Géohyd antea groupe, Olivet, France

L'impact quantitatif et les temps de transfert des pollutions diffuses ne peuvent être abordés aujourd'hui qu'en appliquant les lois physiques de transfert et de dispersion multidimensionnelles supportées par des modélisations complexes et nécessitant de connaître un grand nombre de paramètres. C'est sur ce constat qu'un outil opérationnel permettant de modéliser les transferts quantitatifs des polluants des sols au captage d'eaux souterraines a été développé. L'outil s'appuie sur l'équation du transport par advection dispersion des eaux et sur le concept de Distribution des Temps de Séjour (DTS) dans un réservoir.

La méthode est testée sur le forage de la Saussaye, à Chartres, dont les concentrations en nitrates augmentent de façon préoccupante depuis 30 ans. Il est situé dans les craies (Sénonienne) recouvertes par des argiles d'altération (Ypressien) et par les calcaires de Beauce (Lutécien et Aquitainien)

Les propriétés de la craie ont été estimées à partir d'un pompage d'essai, réalisé à 400m<sup>3</sup>/h pendant 72h, couplé au suivi des hauteurs d'eau sur 13 piézomètres. A partir de ces données, le bassin d'alimentation du captage à été défini grâce à une modélisation MODFLOW. La recharge verticale est ajustée de façon indépendante pour calibrer le modèle. Les vitesses d'écoulement verticales (recharge) et horizontales sont utilisées pour estimer une DTS des eaux pompées au forage.

Pour valider la méthode, des dosages des CFC et SF6 ont été réalisés lors du pompage. La DTS reproduit des temps de séjour proches de ceux estimés par les mesures de CFC/SF6, explique l'évolution des nitrates observée au forage et permet de proposer des scénarios d'évolution de la qualité des eaux en fonction des pratiques agricoles de surface.

### 9.2.14 (p) Etude de la salinité d'une Sebkhah et de ses ressources hydriques par modélisation électrique 3D

Fayçal Bouhmadouche<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie

La prospection électrique implique la détection d'effets produits lorsqu'un courant électrique traverse le sous-sol. L'étude a comporté l'exécution de trente sondages électriques verticaux de type Schlumberger, pour lesquels la longueur de ligne AB est comprise entre 6 m et 1000 m. Ces sondages ont été réalisés, de part et d'autre, d'une Sebkhah.

Le but de l'étude est de déterminer les meilleurs emplacements d'implantation de piézomètres et de définir les limites d'ingression de la Sebkhah et de l'eau de mer en profondeur.

Les résultats de l'interprétation ont permis d'établir plusieurs cartes de résistivité en AB variable et des coupes et pseudo-sections géo-électriques. Ceux-ci aident, surtout, à localiser les milieux aquifères superficiels, afin d'exécuter des forages pour une meilleure exploitation des ressources hydriques.

Cependant, vu l'évolution rapide des moyens informatiques et des différentes techniques, il faut essayer de trouver des choix qui seront, économiquement, porteurs sans pour autant diminuer de la valeur d'une étude donnée. C'est ainsi qu'une modélisation a été tentée sur cette Sebkhah. Ceci a permis d'aboutir à une description 3D aussi complète que réelle de la structure du sous-sol, et par ce fait, pouvoir déterminer, grâce aux résistivités obtenues, la répartition de la salinité en cette zone, et mieux comprendre la cause de son évolution.

L'interprétation des sondages électriques verticaux et l'établissement des cartes et coupes géo-électriques dénotent une eau plutôt salée que, relativement douce, ainsi que l'existence d'un substratum très conducteur associé, d'une part, aux effets de la Sebkhah, et, d'autre part, aux ingressions marines.

En outre, elles ont permis de localiser les zones favorables à l'implantation des ouvrages pour capter les eaux superficielles.

Les contaminations de ces eaux sont possibles pour des profondeurs d'investigation supérieures à environ 50 m. Notons que les zones favorables sont celles situées dans la partie nord, et aux alentours de la partie sud. Il faut signaler que toute la partie centrale est couverte par la sebkhah d'extension E-W.

### 9.2.15 (p) Aspects quantitatifs et qualitatifs des ressources en eau des bassins versants de l'Est algérien

Yassine Ferrah<sup>1</sup>, Ahmed Arafah<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Géodynamique et ressources naturelles, Université de Annaba, Algérie

L'Algérie orientale, est la zone la plus arrosée du pays : elle reçoit annuellement des précipitations variant de 300mm à 1m en allant du Sud vers le Nord et qui atteint parfois 1.5m en allant vers la Méditerranée ; elle est drainée par un important réseau hydrographique d'une densité moyenne de 2.11m/Km<sup>2</sup>. Ces caractéristiques offrent à la région l'avantage d'être une ressource conséquente en eau superficielle. La zone d'étude, couvrant 14860 Km<sup>2</sup>, est située à l'extrême Nord-est Algérien, entre les cours d'eau Medjerda-Mélègue et le bassin Kébir-Rhumel.

En se référant aux conférences internationales (« Dublin » et « RIO »1992) dont les déclarations finales confirment le lien entre le développement durable et la gestion de l'eau, il paraît évident que la gestion des ressources en eau à l'échelle du bassin versant à effectivement acquis le statut de principe du développement durable. Pour être au diapason mondial, l'Algérie, a opté dès les années 1999 pour une gestion des ressources en eau, en bassins. Ceci a conduit à la création de cinq agences de bassins hydrographiques parmi les -quelles l'Agence Constantinois Seybouse et Mélègue, chargée de la gestion des bassins de l'Est algérien, dont celui de la Seybouse cours d'eau important et objet de notre étude.

Le travail réalisé porte sur l'état quantitatif et qualitatif des ressources en eau. En partant du constat que les apports d'eau sont assez importants, mais face à une faiblesse des capacités d'emménagement, une grande partie se déverse dans des oueds excessivement pollués. Ces derniers font office de dépotoirs où convergent les rejets domestiques et urbains. L'étude réalisée porte sur :

- l'analyse des facteurs physiques ainsi que du régime pluviométrique qui caractérisent l'écoulement des bassins versant du Nord Est Algérien,
- l'étude du régime d'écoulement et sa liaison avec les facteurs précédents,
- L'étude du mécanisme hydro-chimique en rapport avec le régime d'écoulement.

### 9.2.16 (p) Comportement hydrodynamique d'un système aquifère côtier en milieu semi-aride. cas de la plaine entre les andalouses et ain-turk (littoral oranais, Algérie)

Mohamed Foukrache<sup>1</sup>, H. Mansour<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire GEOREN, université d'Oran, Algérie

La plaine côtière entre les Andalouses-Aïn Turk est une cuvette exoréique, formée par un système multicouche (alluvions, sables et grès), caractérisé par une perméabilité d'interstices qui confère à ce complexe aquifère une continuité hydraulique bien caractéristique.

Le comportement hydrodynamique de ce système aquifère a été mis en évidence, d'une part, à l'aide d'une cartographie de l'écoulement souterrain et l'analyse des battements de la nappe à différentes périodes et d'autre part, par l'étude des paramètres hydrauliques sur la base de l'interprétation de pompages d'essai les méthodes appropriées, ainsi que la détermination de certains caractéristiques de l'écoulement des eaux souterraines.

Cette démarche nous a permis de définir la dynamique de la nappe et l'évaluation de sa réserve en eau souterraine ainsi que les conditions de renouvellement de sa ressource.

### 9.2.17 (p) Transferts hydrologiques et variations spatio-temporelles de la densité : estimations à partir de la mesure du flux de muons

Fanny Hivert<sup>1,2,3</sup>, José Busto<sup>3</sup>, Jean-Pierre Ernenwein<sup>3</sup>, Jurgen Brunner<sup>3</sup>, Jean-Baptiste Decitre<sup>1</sup>, Ignacio Lazaro Roche<sup>1</sup>, Xavier Martin<sup>2</sup>, Stéphane Gaffet<sup>1,2</sup>,

<sup>1</sup>LSBB, Rustrel

<sup>2</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>3</sup>Centre de Physique des Particules de Marseille, Marseille

Les muons sont des particules chargées d'origine cosmique. Leur masse importante leur confère la capacité de traverser les premières centaines de mètres de la croûte terrestre. L'atténuation du flux de muons dépend directement de la quantité de matière qu'ils traversent. C'est pourquoi ces particules sont utilisées pour mesurer des variations de densité en subsurface.

Dans le cadre du projet T2DM2 (Tomographie Temporelle de la Densité par la Mesure des Muons), les mesures de flux de muons réalisées en laboratoire souterrain (LSBB, Rustrel) ont pour but la caractérisation spatiale et temporelle des variations de densité liées aux transferts des masses d'eau dans la zone insaturée de l'aquifère karstique de Fontaine-de-Vaucluse.

Les premières mesures de flux de muons sont réalisées au LSBB depuis décembre 2013. Le système de détection est composé de 4 détecteurs qui permettent une surveillance du massif suivant différentes ouvertures angulaires. Les flux de muons obtenus sont comparés aux flux simulés. Les questions posées sont alors les suivantes : Une évolution saisonnière du flux de muon, liée à des degrés de saturation en eau variables, est-elle observée dans la zone d'étude ? Le flux de muons varie-t-il de façon différente en fonction de l'ouverture angulaire considérée ?

### 9.2.18 (p) Méthodologie d'identification du potentiel aquifère dans des systèmes complexes : du Massif Central aux Pyrénées

Bernard Monod<sup>1</sup>, Jean-Marie Gandolfi<sup>1</sup>, Maritxu Saplairoles<sup>1</sup>, Robert Wyns<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Ramonville-Saint-Agne

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

Le nouveau modèle d'aquifère de socle consiste en un aquifère multicouche composé par les altérites meubles et l'horizon fissuré. Cet aquifère est stratiforme, avec présence d'une nappe continue à l'échelle du bassin au même titre que dans les bassins sédimentaires. Les études montrent que 85 à 90 % de la réserve en eau est contenue dans l'horizon fissuré, bien que les porosités y sont sensiblement plus faibles que dans les altérites.

L'origine des fissures constituant l'horizon fissuré réside dans le processus même de l'altération et va donc dépendre de la minéralogie des roches et de l'âge de l'altération. Une méthodologie a donc été proposée à partir de travaux de terrain impliquant une étude géomorphologique des surfaces d'altération associée à l'identification du degré d'altération des minéraux. Ces informations géologiques ont été croisées avec des données hydrogéologiques, telles que les débits de sources, les niveaux piézométriques, les prélèvements en eaux souterraines, les niveaux de base des cours d'eau, afin de réaliser une carte des potentialités aquifères des formations de socle. Les travaux menés en région Midi-Pyrénées sur les formations du Massif Central ont montré six paléosurfaces principales datées au Carbonifère, infra-Permien, infra-Triasique, infra-Liasique, infra-Crétacé, Eocène. Parmi elles, les paléosurfaces antérieures au Lias ont subi un colmatage de l'horizon fissuré, alors que

les surfaces infracrétacé et éocène ont normalement conservé une porosité ouverte. La carte finale représente des formations favorables sur plus d'un tiers de la zone étudiée et une première estimation des réserves en eau souterraine est globalement évaluée à 550 M m<sup>3</sup> sur la zone d'étude. Des travaux de forages d'exploitation d'eau potable sont en cours de réalisation sur les surfaces les plus favorables du département du Lot. Un travail similaire vient d'être engagé dans le massif des Pyrénées.

to study analogs at different structural levels. Then, a tectonic sketch of faults interaction, along with volcanism, is proposed to act as a key factor to geothermal body formation in arc context.

### 9.2.19 (p) Calibration du modèle SWAT sur une zone de captage d'eau superficielle à l'aide du logiciel PEST

Léonard Santos<sup>1</sup>, Alexandre Pryet<sup>1</sup>, Odile Leccia<sup>2</sup>, Françoise Vernier<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Géoresources et Environnement, Pessac*

<sup>2</sup>*Unité Aménités et dynamiques des espaces ruraux, Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture, Cestas*

SWAT est un modèle agro-hydrologique permettant de prédire la réponse hydrologique et hydrochimique d'un bassin versant en fonction des pratiques agricoles. Il a été développé outre-Atlantique dans les années 80 et est très utilisé à travers le monde. C'est un modèle à base physique qui prend en compte beaucoup de processus et dépend donc de nombreux paramètres. Cette caractéristique fait de lui un modèle difficile à calibrer. L'objectif final de ce projet est de modéliser avec SWAT les pressions agricoles sur le bassin de la Charente et ainsi d'identifier l'impact de différents scénarios d'évolution des pratiques agricoles.

Ces travaux ont consisté à calibrer le modèle SWAT sur un sous-bassin versant de la Charente à l'aide du logiciel de calibration PEST. La calibration se concentre sur les paramètres influençant les processus purement hydrologiques du modèle. Le modèle PEST a permis d'identifier les principaux facteurs de contrôle de la réponse hydrologique dans le modèle SWAT qui influencent la réponse hydrologique. Il permet aussi de mettre à jour les problèmes d'équifinalité associés à la corrélation entre paramètres.

### 9.2.20 (p) Structural control of geothermal bodies within volcanic arcs : examples in the Lesser Antilles

Yves Mazabraud<sup>1</sup>, Jean-Frédéric Lebrun<sup>1</sup>, Boris Marcaillou<sup>1</sup>, Arnauld Heuret<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*LARGE, Pointe à pitre*

The subduction of the Atlantic plate underneath the Caribbean oceanic plateau in the Lesser Antilles is at the origin of its well known arc magmatism. Not only this phenomenon constructs the arc itself, it is also associated with heat transfer from the deep toward the surface. When interacting with meteoric or sea water, the heat will trigger convection of fluids. Within the rocks, faults can be modeled as higher permeability planar structures draining the fluids. When sub-vertical, they allow fluids transfer toward the surface. Therefore, the convection is controlled by the local structural pattern. Active and fossil geothermal bodies in the Lesser Antilles are associated with a specific fault pattern (Bouchot et al. 2011, Mazabraud 2012). In the Lesser Antilles volcanic arc, this pattern is dependant of the subduction related stress pattern with a strong structural heritage (Lardeaux et al. 2012). In Guadeloupe, we are conducting a series of experiments, both on-shore and off-shore, in order to better define the resource related local pattern and its origin.

The work presented here focuses on the means to achieve geologic models in this context. It demonstrates the need to work at all scales and

## 9.3 Transport réactif, pollution, atténuation naturelle

### (Reactive transport, pollution, natural attenuation)

#### Responsables :

- Olivier Atteia (ENSEGID, Bordeaux)  
olivier.atteia@ipb.fr
- Alain Bourg (UPPA, Pau)  
alain.bourg@univ-pau.fr
- Michel Jauzein (Ecole des Mines de Nancy)  
michel.jauzein@mines-nancy.univ-lorraine.fr

#### Résumé :

Ce thème réunit les approches de transport, de réactivité et de comportement des polluants dans les aquifères (on ne parle pas ici de la zone non saturée qui fait l'objet d'une session à part, la session 9.4).

Les polluants concernés sont les composés inorganiques (métaux, métalloïdes, mais pas seulement) et organiques (d'origine domestique ou industrielle). On s'intéressera aux phénomènes physiques (volatilisation, transport sous forme non aqueuse), hydrogéochimiques (adsorption, précipitation, oxydo-réduction, ...) et microbiologiques.

Ce thème est amené à confronter les aspects théoriques et la modélisation aux mises en oeuvre pratiques telles que des campagnes de mesures de terrain (isotopes, paramètres physiques, biologiques ou chimiques, ...), l'utilisation de techniques de dépollution ou d'atténuation naturelle.

#### Abstract :

This topic concerns the transport, reactivity and behavior of contaminants in aquifers (the unsaturated zone is covered in session 9.4).

The pollutants considered are inorganic (metals, metalloïds and others) and organic (of both domestic and industrial origin). We are interested in physical (volatilization, non aqueous phase transport), hydrogeochemical (adsorption, precipitation, oxydo-reduction, ...) and microbiological phenomena.

This topic will compare theoretical and modeling aspects to practical applications such as on-site measurements (isotopes, physical, biological or chemical parameters, ...), remediation technology or natural attenuation.

### 9.3.1 (o) Dégradation de PAHs by steam/air injection - characterization and optimization

Alexandre Bordenave<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ENSEGID, Pessac

**Background/Objectives.** Conventional technologies have proven their limited success in achieving timely cleanup of NAPL contaminated soils. For this reason, an innovative technology based on the co-injection of steam and air was developed in the United States. This technology allows to recover volatile compounds and to favor the degradation by oxidation of semi-volatile compounds. The literature refers some preliminary experiments led in laboratory, which showed the efficiency of degradation by oxidation on volatile or semi-volatile compounds at temperatures easily achieved in thermal remediation. However, similar tests have not been done with heavier compounds. Consequently this study aims at highlighting and maximizing the degradation by oxidation of PAHs.

**Approach/Activities.** To achieve this objective, experiments using stainless steel cells were conducted. Spiked and polluted soil matrix were introduced into cells, and then heated at 120°C in presence of oxygen. The influence of natural parameters (temperature, residence time, composition of soil) was studied. First results showed that the reaction does not occur at these temperatures without any catalysts. As shown by literature, natural compounds of the soil (iron oxide, manganese oxide or cerium oxide...) could play a significant role of catalyst for PAH's reaction of oxidation. Consequently, some experiments were led using different type of catalysts.

**Results/Lessons Learned.** Results showed that the reaction occurred in presence of catalysts. Moreover, results proved that the production of CO<sub>2</sub> has been higher in presence of cerium oxide. The different protocols tested allowed to investigate reaction mechanisms. As a general rule, contact between PAH/Soil/Catalyst/Oxygen is the major factor determining the achievement of the experiment. Finally these experiments led to a specific methodology that aims at maximizing the degradation.

### 9.3.2 (o) Estimation des flux de COV du sol vers les bâtiments

Grégory Cohen<sup>1,2</sup>, Marian Momtbrun<sup>2</sup>, Olivier Atteia<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>GEORESSOURCES ET ENVIRONNEMENT, Pessac

<sup>2</sup>Fondation INNOVASOL, Pessac

Les intrusions de vapeurs se produisent lors de la migration d'un produit chimique volatil (e.g. Composés Organiques Volatils (COV)) depuis des sols ou des eaux souterraines pollués vers les bâtiments. Les COV s'infiltrant dans le sol sous forme liquide, puis migrent vers les nappes phréatiques, avant de se volatiliser et de remonter vers la surface, sous forme gazeuse, par diffusion et/ou advection à travers le sol et les fondations des bâtiments. Quelques études expérimentales et numériques ont investigué l'influence des précipitations sur le transport des gaz en zone non saturée (ZNS). Cependant, une explication complète de l'évolution des concentrations du polluant dans la phase gazeuse face aux événements pluvieux n'est toujours pas disponible.

Des expériences de migration de COV en ZNS sont menées sur une colonne instrumentée pour suivre l'évolution des teneurs en eau et réaliser des prélèvements gazeux dans le milieu poreux. Le COV est injecté sous forme liquide en pied de colonne. Les flux sont mesurés en tête de colonne par sorption sur charbon actif. Des simulations numériques sont menées pour observer l'effet de l'intensité des précipitations (1 puis 2 cm pendant 2 h) sur les concentrations en polluant en fonction du type de sol (sableux ou limoneux).

Les résultats du modèle montrent l'influence de l'intensité de la pluie

sur les concentrations en COV pour différents sols. En fonction de l'intensité de la pluie et des propriétés hydrauliques du sol, l'eau va s'infiltrer plus ou moins profondément et rapidement et faire baisser les concentrations en COV. Les paramètres physiques du sol influencent significativement le profil des concentrations en phase gazeuse lors de l'infiltration. En sol sableux, le flux d'eau conduit à un lessivage du polluant présent dans l'air. Les écoulements étant plus lents en sols limoneux, ce processus est moins marqué. Ces résultats doivent être validés expérimentalement. Différents cas sont étudiés et les observations réalisées sont comparées aux résultats de la modélisation.

### 9.3.3 (o) Oxydation en Batches et sur colonnes de composés du diesel (n-alcanes) et de BTX par différents oxydants

Florie Jousse<sup>1</sup>, Olivier Atteia<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fondation Innovasol, ENSEGID, Pessac

<sup>2</sup>ENSEGID, Pessac

De nos jours, la préservation de l'environnement est un enjeu majeur. Avant cette prise de conscience, de nombreux polluants ont été rejetés dans le réservoir naturel. Une grande partie de ces polluants sont des hydrocarbures. La mise en place de techniques de dépollution efficaces est essentielle. Le traitement de ces polluants pose des problèmes techniques et économiques. En effet, les techniques classiques sont l'excavation des terres polluées et le pompage des nappes d'hydrocarbures impliquant des coûts de dépollution élevés. Le développement de techniques d'oxydation chimique in-situ est un bon moyen pour lutter contre cette classe de polluant en les dégradant directement à la source. Les oxydants couramment utilisés sont le permanganate, le persulfate, le fenton et l'ozone. L'utilisation des deux derniers oxydants permet un rejet d'oxygène et ainsi contribue au développement de l'activité biologique du sol. Le but de cette étude est de comparer l'efficacité des différents oxydants face aux hydrocarbures légers et moyens dans un milieu poreux donné.

Le site d'étude montre une pollution à un mélange Gasoil-fuel sur une surface de 25×45m. Dans un premier temps, les oxydants ont été testés sur cette pollution dans des batchs agités afin de comparer leurs efficacité respective. Dans un deuxième temps, des colonnes de 10 cm ont été réalisées afin de reproduire l'écoulement en milieu naturel. Les oxydants ont été également testés ainsi que d'autres techniques telles que l'injection de tensio-actif, l'injection d'air et enfin le traitement thermique. Le but final de cette étude est de déterminer la méthode la plus avantageuse à appliquer sur site, tant en terme d'efficacité qu'en terme de coût.

### 9.3.4 (o) Etude du transport de bactéries dans les sols et de leur rôle dans la lixiviation et le transfert accéléré des métaux lourds

Jean Martins<sup>1</sup>, Aurélien Desauvay<sup>1</sup>, Aline Navel<sup>1</sup>, Véronique Guiné<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LTHE, Grenoble

Les cellules bactériennes sont connues pour être mobiles dans les environnements souterrains favorisant ainsi largement les processus de colonisation des milieux naturels ou de dispersion de maladies en lien avec la mobilité de cellules pathogènes ou de virus. La dynamique des microorganismes et plus particulièrement des bactéries dans la zone non saturée des sols joue aussi un rôle prépondérant dans des processus importants tels que les flux d'éléments dans notre environnement proche. Toutefois, peu d'informations sont aujourd'hui disponibles sur la mobilité cellulaire des bactéries en milieux poreux naturels et sur leur rôle réel dans le transfert facilité de polluants (organiques ou inorganiques) dans les sols. Ceci limite fortement l'amélioration des modèles de transfert de contaminants qui négligent ainsi un (des) processus important

de transport de composés ou éléments toxiques dans ces milieux, et limite donc aussi notre capacité de prédiction de l'évolution de la qualité des milieux. Par une approche expérimentale et théorique couplée et en combinant des essais statiques et de dynamique des systèmes en colonnes de sols nous avons pu évaluer les principaux facteurs biotiques et abiotiques contrôlant la mobilité de bactéries modèles (*Escherichia coli* et *Cupriavidus metallidurans* CH34) en milieux poreux et leur aptitude à lixivier et à transporter des métaux lourds de manière accélérée. Une modélisation hydro-géochimique couplée a été appliquée avec succès pour reproduire nos résultats de transfert des bactéries ainsi que des métaux en conditions de saturation en eau.

### 9.3.5 (o) An in situ probe for trace metal speciation analysis in freshwaters

Corinne Parat<sup>1</sup>, Laurent Authier<sup>1</sup>, Jose Paulo Pinheiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LCABIE-IPREM, Pau

<sup>2</sup>Universidade do Algarve, Departamento de Química e Bioquímica, Faro, Portugal

The knowledge of the free ion concentrations of metals like Zn, Cd or Pb is key to predict the biouptake of trace elements and, thus, assess for the ecotoxicological risk. The analytical challenge is to develop a reliable in situ probe for dynamic metal speciation at trace levels in natural waters.

Regarding autonomy problems of in situ probes, electrochemical devices have the advantage of being easily available in small sizes and been battery operated. Consequently, an in situ probe based on two stripping methods, absence of gradients and nernstian equilibrium stripping technique (AGNES) [1] and stripping chronopotentiometry at scanned deposition potential (SSCP) [2, 3], has been developed. To cross-validate the obtained results, a well-established method to measure free metal ion concentration, the Donnan Membrane Technique device (DMT) [4], has been included to the in situ probe. A screen-printed electrode has been connected to the acceptor solution of the DMT through a flow-cell for the in situ trace metal electrochemical detection in order to shorten the analysis time and to avoid bringing the acceptor solution to the laboratory for ICP-MS analyses.

This dual detection electrode system has been optimized regarding the effects of environmental conditions like pH or ionic strength. The required parameters for in situ analyses have been identified from different synthetic solutions of multi metal mixtures. Then, results obtained with well-known complexes have been compared with Visual MINTEQ data.

First results have shown that pH and ionic strength of the donor and acceptor solutions needed to be taken into account in the case of multi-contaminations. Investigations are in progress to propose an analytical procedure to consider these parameters when using a dual detection electrode probe.

[1] C. Parat, L. Authier, D. Aguilar, E. Companys, J. Puy, J. Galceran, M. Potin-Gautier, *Analyst* 136 (2011) 4337-4343.

[2] M. Diaz-de-Alba, M. D. Galindo-Riano, J. P. Pinheiro, *Environmental Chemistry* 11 (2014) 137-149.

[3] C. Parat, A. Schneider, A. Castetbon, M. Potin-Gautier, *Analytica Chimica Acta* 688 (2011) 156-162.

[4] L. Marang, P. Reiller, M. Pepe, M. F. Benedetti, *Environmental Science & Technology* 40 (2006) 5496-5501.

### 9.3.6 (o) Hydrobiogeochemistry and control of the transport of manganese during the infiltration of river water into a well field in an alluvial aquifer, the case of Capdenac-Gare (12)

Alain Bourg<sup>1</sup>, Monika Kedziorek<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Géoressources et Environnement, UPPA, Pau

<sup>2</sup>Géoressources et Environnement, Pessac

Manganese oxides are ubiquitous in the solid phases of surface- and ground-water systems. In riverbank filtration (a river recharging an alluvial aquifer), these oxides can react with dissolved organic matter according to

$$\text{MnO}_2(\text{s}) + 1/2 \text{CH}_2\text{O} + 2 \text{H}^+ \text{ gives } \text{Mn}^{2+} + 1/2 \text{CO}_2 + 3/2 \text{H}_2\text{O}$$

releasing dissolved Mn detrimental to the quality of drinking water resources. Even though protons and electrons are involved in the MnO<sub>2</sub>(s)/Mn<sup>2+</sup> redox couple, dissolved Mn shows no simple correlation to either Eh or pH. Instead, a compilation of field investigations reveals separate seasonal trends for river water (high summer pH, low summer dissolved O<sub>2</sub> and Mn) and for groundwater (low summer dissolved O<sub>2</sub>, high summer dissolved Mn with no observed trend in pH). These results allow us to highlight the influence of respiration and photosynthetic processes on the dissolutive hydrogeochemistry of Mn.

### 9.3.7 (p) Modélisation numérique de transport des solutés dans un milieu poreux saturé

Abdelkader Hachemi<sup>1</sup>, Boualem Remini<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire MVRE / ENSH ENSH BP 31 Blida - Algérie

<sup>2</sup>Eau et environnement université Saad Dahleb Blida - Algérie

La modélisation du transport des soluté en milieu poreux saturé utilise des modèles hydro- dispersifs.

Ces modèles couplent les équations d'écoulement densitaire et de transport de soluté.

La stabilisation de l'équation de transport pour un nombre de pecllet supérieur à deux nécessite l'application des méthodes spécifiques telles que SUPG et limiteur de pentes.

Le présent travail consiste à élaborer un code de calcul par éléments finis pour simuler l'intrusion des eaux de mer dans les aquifères côtiers. Le modèle numérique établi est basé sur le modèle mathématique quasi tridimensionnel développé par Sorek et al. (2002) et qui consiste à résoudre l'équation de transport par SUPG (Streamline Upwind Petrov Galerkin).

Le code de calcul sera appliqué sur le cas d'une intrusion marine dans une nappe libre côtière où les résultats de simulation seront t comparés à d'autres résultats obtenus par le modèle d' l'interface abrupte.

### 9.3.8 (p) Transport particulaire en milieu poreux et interactions chimiques avec l'eau du sol : cas des laitiers sidérurgiques

Oriane Houecande<sup>1</sup>, Didier Graillot<sup>1</sup>, Jacques Moutte<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences et Environnement / Centre des Processus Industriels et Naturels, École Nationale Supérieure des Mines, Saint-Étienne

La production de fonte et d'acier génère dans tout procédé industriel des coproduits majoritairement composés de laitiers sidérurgiques. Ces

derniers représentent l'une des principales causes de contamination métallique d'origine industrielle rencontrées dans l'environnement. La migration de ces métaux demeure parfois mal élucidée en raison de la diversité et de la complexité du sol mais aussi à cause de l'influence des paramètres physico-chimiques du milieu sur les propriétés de ces substances polluantes.

De nombreuses recherches ont été menées sur le transport sous forme dissoute mais très peu concernent le transport sous forme particulaire dans un contexte de contamination métallique. Ainsi, on s'intéresse au transport de particules et de façon indirecte au transport d'éléments traces, en interaction avec la physico-chimie de l'eau dans un milieu poreux hétérogène. Le sol étudié est un technosol sur un crassier de laitiers accumulés depuis 150 ans.

La caractérisation de quatre laitiers (de fusion et d'affinage) a été effectuée par cathodoluminescence, MEB, granulométrie laser, DRX, analyse chimique totale et ménagée. Les résultats montrent des phases de haute température typiques des laitiers (brownmillérite, magnétite, wollastonite, larnite) et des phases d'altération météorique (brucite, portlandite, hématite, dolomite, calcite). Les lixiviats se caractérisent par un pH supérieur à 12 et des teneurs élevées en Ca, Si, Al, Cu, Cr, V, Mo. Les mécanismes intervenant dans le transport de ces particules métallifères et leurs interactions avec le substrat sont étudiés par des essais en colonne en conditions saturée et non saturée.

## 9.4 Caractérisation et transfert en milieux karstiques (AFK, IAH Karst commission, CNFGG)

### (Characterisation and transfer in karstic media) (AFK, IAH Karst commission, CNFGG)

#### Responsables :

- Hervé Jourde (HydroSciences Montpellier)  
herve.jourde@um2.fr
- Nicolas Massei (Morphodynamique Continentale, Rouen)  
nicolas.massei@univ-rouen.fr
- David Labat (GET, Toulouse)  
david.labat@get.obs-mip.fr
- José A Cuchí Oterino (Univ. de Saragosse, Espagne)  
cuchi@unizar.es

#### Résumé :

Comme pour tout système hydrologique, la compréhension du fonctionnement des environnements karstiques est essentielle dans un but de gestion optimale de la ressource en eau potable ou encore dans un souci de prévention des risques liés aux inondations subites. Toutefois, à la différence d'autres hydrosystèmes, les environnements karstiques présentent deux particularités : i) une forte hétérogénéité se propageant à de multiples échelles spatiales et à l'origine d'une grande diversité de réponses hydrologiques ; ii) une quasi-impossibilité, sauf cas exceptionnel, d'identification de l'ensemble de la structure physique qui conditionne la réponse hydrologique d'un système donné.

Ces spécificités du karst seront abordées au travers des thématiques suivantes :

- Structuration géométrique des réseaux et karstogénèse,
- Développements méthodologiques pour l'analyse des hydrosystèmes karstiques,
- Modèles de transferts de fluide (eau - gaz) et de transport de matières (sédiments, polluants, éléments majeurs, cycle du carbone),
- Relations entre fonctionnement hydrologique du karst, fluctuations climatiques et pressions anthropiques
- Interactions entre société civile / gestionnaires et milieu karstique. Gestion active et protection de la ressource en eau.

#### 9.4.1 (o) Étude des dolines pour la compréhension du fonctionnement des aquifères karstiques dans un bassin sédimentaire

Olivier Cabaret<sup>1</sup>, Jérôme Perrin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Pessac

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

En Dordogne, la gestion des eaux souterraines se heurte à la nature karstique de certains des aquifères carbonatés. Ceci entraîne la variabilité temporelle des débits et signatures chimiques des sources et une vulnérabilité des captages aux pollutions. Depuis deux ans, un programme a été mis en place afin d'améliorer l'état des connaissances de ces réservoirs et de préciser leurs modalités de fonctionnement. Parmi les éléments de compréhension, l'identification des processus d'infiltration depuis la surface vers la nappe est nécessaire. Dans ces processus, le rôle joué par les dolines peut être déterminant car elles peuvent constituer des chemins d'infiltration préférentiels vers la nappe et avoir ainsi une incidence sur la quantité et la qualité des eaux souterraines mais aussi sur les vitesses de transfert depuis la surface.

Un inventaire des dolines a été mené sur la base des informations cartographiques (cartes géologiques, orthophotos, ...) et bibliographiques (rapports des bureaux d'études et thèses...). Ces informations ont permis d'édifier une carte de répartition des dolines par aquifère. Elle révèle une disposition assez hétérogène des dolines sur le territoire et une densité très différente selon les réservoirs. La confrontation de cette carte avec des données hydrogéologiques fournit des pistes de compréhension du fonctionnement des aquifères : un travail préliminaire portant sur l'analyse de la signature chimique des émergences et la présence de dolines dans leur bassin d'alimentation montre que les concentrations et variations saisonnières en nitrates étaient plus importantes au niveau des sources dont le bassin d'alimentation présentait une densité importante de dolines. Ce travail sera poursuivi sur les traceurs naturels (tels la pCO<sub>2</sub>) et sur le fonctionnement hydrodynamique (dynamique de recharge par exemple). In fine, la densité de dolines devrait pouvoir constituer un indicateur utile à la caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques.

#### 9.4.2 (o) Integrating relationships between sedimentary, diagenetic and tectonic structures to quantify karst groundwater reserves at the regional scale : Example of the Toulon area multiphase Mediterranean karst (South-east, France.)

Cécile Baudement<sup>1</sup>, Yves Guglielmi<sup>1</sup>, Juliette Lamarche<sup>1</sup>, Bruno Arfib<sup>1</sup>, Philippe Léonide<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

In the Mediterranean area, karst aquifers are important groundwater reserves nested in carbonate series that experienced complex geodynamic and climatic histories. It is commonly admitted that the sea level decreases during the messinian strongly conditions the deep drainage of these aquifers through the development of large karstic conduits that are currently drowned. The key question is about the karst's groundwater reserves, their location within the thick carbonate series and what geodynamical factors condition the current karst's storage. Situated at the boundary between the crystalline and the calcareous Provence, the Toulon area is characterized by a geological complexity typically influenced by several evolutions. Here we describe a multidisciplinary approach that couples structural and sedimentological analyses of carbonate series with the hydrogeological context. The originality is to integrate a refined

diagenetic and fracturation sequence in a three-dimensional geomodeling (with GoCad code), to identify and quantify in three-dimensions the key geodynamic events that affect the porosity within the carbonate series. In this contribution, we show how a balanced cross-section colored with some diagenetic constraints may help localize the karst groundwater reserve at the regional scale.

#### 9.4.3 (o) Karstification dans les mudmounds waulsortiens dolomités (Belgique)

Lorraine Dewaide<sup>1</sup>, Jean-Marc Baelé<sup>2</sup>, Vincent Hallet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Namur, Département de Géologie, Faculté des Sciences, Belgique

<sup>2</sup>Université de Mons, Géologie Fondamentale et Appliquée, Mons, Belgique

Les mudmounds waulsortiens sont des formations lenticulaires de plusieurs kilomètres de long pour quelques centaines de mètres d'épaisseur. Elles correspondent à des accumulations de boues carbonatées déposées au Carbonifère (Tournaisien, Viséen) notamment dans l'aire de sédimentation de Dinant (Sud de la Belgique). Ces lentilles ont subi une dolomitisation secondaire très hétérogène laissant des noyaux dolomitiques épars au sein des masses calcaires. Une karstification très dense affecte ces mudmounds ; et, fait étonnant, une importante proportion du karst se développe dans les intervalles dolomités des roches waulsortiennes. Ces phénomènes karstiques présents dans la dolomie montrent par ailleurs des caractéristiques particulières. Tout d'abord, il s'agit le plus souvent de coupoles et cavités dont le développement est plurimétrique au maximum. Ces cavités, bien que développées au sein des « patchs » dolomitiques, présentent autour d'elles une auréole de calcite microcristalline ou grossière. Des rhomboèdres de calcite de taille importante (décimétrique) peuvent tapisser les parois des cavités. Enfin, l'ensemble du phénomène est développé au droit d'une discontinuité. L'étude d'échantillons provenant de ces phénomènes karstiques, notamment via cathodoluminescence, a abouti à l'élaboration d'un modèle génétique du karst et des processus associés qui propose que la dolomie ait subi une phase de dissolution majeure prenant place au droit de discontinuités. La dissolution de cette dolomie a pour conséquence la création d'une porosité - micro- et macroscopique- importante du matériau. Ces vides ont ensuite été parcourus par divers fluides qui ont modifié l'équilibre chimique local entraînant certaines réactions dont le résultat est observable aujourd'hui sous la forme d'une auréole de calcite. Deux processus majeurs ont été mis en évidence : une dédolomitisation s.s. affectant la dolomie résiduelle d'une part ; d'autre part, une cimentation par de la calcite qui a scellé les vides créés au préalable par dissolution de la dolomie initiale. Dans les vides les plus importants, la cimentation s'exprime par la cristallisation d'imposants rhomboèdres de calcite mais elle est restée partielle laissant les vides observables aujourd'hui sous forme de cavités karstiques.

#### 9.4.4 (o) How gravity and geophysical tools can monitor time and spatial variations of an epikarstic reservoir

Arnaud Watlet<sup>1</sup>, Olivier Kaufmann<sup>1</sup>, Olivier Francis<sup>2</sup>, Michel Van Camp<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Université de Mons, Mons, Belgique

<sup>2</sup>Université du Luxembourg, Luxembourg

<sup>3</sup>Royal Observatory of Belgium, Belgique

Present knowledge of karst systems has evidenced the importance of the unsaturated zone on the water dynamics. Temporary perched aquifers can appear in the epikarst layer due to changes of climate conditions,

the lack of evapotranspiration in the winter and differences of porosity relative to deeper layers. We present results covering one year of geophysical monitoring at the Rochefort Cave Laboratory, which is located in the Variscan fold-and-thrust belt (South Belgium), in a region that shows many karstic networks within Devonian limestone units. A microgravimetric monitoring is a reliable technique to inform on the amount of water stored in the epikarst. Relative gravimetric monitoring calibrated with data of an absolute gravimeter has been set up in November 2013. It records continuously gravity changes in the surface laboratory of the Rochefort Cave. Ten additional stations (seven at the surface, three in the cave) have been monitored on a monthly basis since December 2013 by a spring gravimeter. These latter datasets should give crucial information on the spatial variations of the epikarstic groundwater reservoir through time.

To support these gravimetric measurements, the field site has been equipped with an Electrical Resistivity Tomography (ERT) monitoring system recording data on a daily basis since February 2014. This system provides valuable data to infer variation of the saturation rate within the epikarst. A seismic ambient noise study over this ERT profile is an additional tool to confirm spatial epikarstic extensions.

#### 9.4.5 (o) Modélisation géométrique des systèmes karstiques : des réseaux aux conduits

Pauline Collon-Drouaillet<sup>1</sup>, Guillaume Rongier<sup>1</sup>, Martin Le Mesnil<sup>1</sup>,  
Lorraine Dewaide<sup>2</sup>, Vincent Hallet<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Georessources, Nancy

<sup>2</sup>Université de Namur, Département de Géologie, Namur, Belgique

Les karsts sont des systèmes caractérisés par une grande hétérogénéité : i) de perméabilité entre des conduits karstiques drainant rapidement les écoulements et une matrice moins perméable, ii) et aussi de structure puisque tant les dimensions des drains que leur organisation spatiale présentent des variabilités considérables. Cette dernière hétérogénéité joue un rôle essentiel dans la circulation des fluides souterrains alors qu'une part importante des réseaux karstiques reste inaccessible à l'exploration humaine. Développer de nouvelles méthodes de simulations stochastiques est donc indispensable pour appréhender les incertitudes associées à la localisation et à la géométrie de ces systèmes. Nos travaux abordent ces deux aspects complémentaires.

A l'échelle du réseau karstique, ce sont la localisation et les connexions des conduits qui constituent le niveau d'incertitude majeur. Grâce aux essais de traçage, des couples entrée/sortie peuvent être identifiés ainsi que la distance moyenne séparant ces points. La méthode de simulation que nous proposons génère plusieurs squelettes possibles honorant ces données. Réalisée au sein d'un géomodeleur 3D, elle est contrainte par le contexte géologique local : données de fracturation et présence de plans d'inceptions tectoniques ou lithostratigraphiques. A l'échelle du conduit karstique, une méthode spécifique basée sur la distance-aux-objets a été développée pour représenter des formes particulières rencontrées en milieu karstique (lentilles, serrures, etc). Là encore cette méthode utilise le contexte géologique pour générer des morphologies cohérentes. Son application au karst de Furfooz (Belgique) a démontré l'impact qu'une telle modélisation peut avoir sur l'estimation des sections de conduits et donc sur les simulations d'écoulements.

#### 9.4.6 (o) Dimensionnement des systèmes karstiques par modélisation des essais de traçage - Le programme OTIS

Lorraine Dewaide<sup>1</sup>, Amaël Poulain<sup>1</sup>, Isabelle Bonniver<sup>1</sup>, Vincent Hallet<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Namur, Département de Géologie, Faculté des Sciences, Namur, Belgique

Les essais de traçage sont des outils puissants lorsqu'ils sont utilisés de manière quantitative dans le but de caractériser le transport de solutés dans les conduits karstiques. L'analyse et la modélisation des courbes de restitution du traceur (CRT) permettent de préciser différents paramètres de transport, d'évaluer la géométrie des sections d'écoulements, et de simuler le comportement du système karstique dans différentes conditions de débit. Les CRT issues d'essais de terrain montrent la plupart du temps une décroissance caractérisée par une longue queue qui ne peut pas être expliquée par l'advection et la dispersion mais qui est souvent associée aux effets de retard. Ces derniers sont communément expliqués par la présence de zones d'eau immobile sur le parcours du traceur dans lesquelles celui-ci va être piégé temporairement, provoquant un retard dans sa restitution. Cette approche a été développée par Field et Pinsky (2000) dans le « two-regions non-equilibrium model » qui suppose un échange entre la zone de flux principal et des zones immobiles le long d'un conduit. Le programme OTIS (One-dimensional Transport with Inflow and Storage) développé par Runkel et initialement créé pour modéliser le transport de soluté en rivière, est basé sur l'équation classique d'advection-dispersion mais prend en compte la possibilité de retard créé par des zones de stockage temporaire. Ce programme qui repose donc sur la solution du two-regions non-equilibrium model a été appliqué avec succès dans le cadre de deux études réalisées sur la Lesse souterraine en Belgique. Une première étude menée sur le réseau d'Han-Sur-Lesse a permis de développer une méthode et de tester l'efficacité d'OTIS, le système karstique étant relativement bien connu. OTIS a ensuite été utilisé dans une étude (toujours en cours) sur le réseau de Furfooz dans le but de dimensionner le système actif qui est, lui, peu connu. Une comparaison des paramètres de transport peut par ailleurs être établie entre les deux systèmes qui dans un cas (Han-Sur-Lesse) se caractérise par l'engouffrement d'une rivière entière dans un vaste réseau de zones noyées, et qui dans l'autre cas (Furfooz), correspond à une perte partielle d'eau de surface vers un système de conduits drainant un faible débit qui rencontre sur son parcours une importante masse d'eau au sein d'un réservoir.

#### 9.4.7 (o) KARSTMOD - A generic modular reservoir model dedicated to spring discharge modeling and hydrodynamic analysis in karst

Naomi Mazzilli<sup>1</sup>, Nicolas Lecoq<sup>2</sup>, Hervé Jourde<sup>3</sup>, Bruno Arfib<sup>4</sup>,  
Dominique Bertin<sup>5</sup>

<sup>1</sup>EMMAH, Avignon

<sup>2</sup>Laboratoire M2C, Université de Rouen

<sup>3</sup>Hydrosciences Montpellier

<sup>4</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>5</sup>Geonosis, Saint Jean du Pin

Karst basins result from several polyphased digging and erosion processes that affect heterogeneous and fractured carbonated rocks ; in such terrains, dissolution and collapsing lead to a network of heterogeneous and anisotropic underground voids, particularly difficult to apprehend. From a numerical modeling point of view, water flowing within conduits can reach velocities of several meters per second while water flowing through fractures or the fissured matrix travels much more slowly. In light of this discrepancy, karst aquifers exhibit nonlinear hydrodynamic behaviors that include threshold effects which are naturally difficult to quantify and forecast but must be accounted for in models. On the basis of the characterization of the different karst subsystems (Soil/Epikarst - Unsaturated Zone - Saturated Zone) and mathematical models developed on specific sites, we propose an adjustable modeling platform of

karst for both the simulation of spring discharge at outlets and the analysis of the hydrodynamics of the compartments considered in the model. This platform is generic in the sense that its aim is to propose a modular model structure adaptable to each specific site. It was realized within the framework of the KARST observatory network initiative from the INSU/CNRS, which consists in organizing research at the national scale to bring out issues and scientific advances in karst, specifically in terms of links between physical processes and both hydrodynamics and hydrochemistry. The modular property allows to reproduce most mathematical reservoir models structures of the literature. In order to avoid time-consuming calibration, a monte carlo procedure is included in the platform, allowing the automatic adjustment of the parameters. The platform also provides various graphical outputs. Thanks to its friendly interface, no programming skills are required to run the modeling platform. KARSTMOD will prove especially useful for teaching and occasional users.

#### 9.4.8 (o) Linear and Nonlinear System Engineering techniques applied to the Fuenmayor Karst Spring, Huesca (Spain)

José Antonio Cuchí Oterino<sup>1</sup>, David Chinarro Vadillo<sup>2</sup>, José Luis Villarroel Salcedo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Aragón Institute of Centre of Engineering Research. University of Zaragoza, Espagne

<sup>2</sup>San Jorge University, Zaragoza, Espagne

Fuenmayor is a modest karst spring that tapes a small limestone aquifer near Huesca, Spain. A monitor station built on 2002 on the spring have provided an hourly dataset of rainfall, discharge, water electrical conductivity and temperature and air temperature. By the use of System Engineering black box techniques, a linear transfer function between effective rainfall and discharge has been concluding that Fuenmayor has an acceptable linear response of 0.8164, evaluated by the Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient. However, the linear model does not estimate adequately the response to some events where the non-linearities are evidenced. To deal with the nonlinear characteristics of Fuenmayor, it is proposed a black box model based on the Hammerstein-Wiener block-oriented structure. It is composed by a linear dynamic system surrounded by two static nonlinearities at its input and output. Seven different configurations of blocks are studied. A good result is obtained with a configuration where the linear block is a second order transfer function, with a zero and seven unit delays. The first nonlinear block is a piecewise polynomial and the second block has been suppressed. The running test draws out a maximum Nash-Sutcliffe efficiency of  $E=0.9383$ , a value better than the linear response.

#### 9.4.9 (o) Evaluation de l'impact du changement climatique sur la ressource en eau du système karstique du Lez au moyen d'un modèle global semi-distribué

Yvan Caballero<sup>1</sup>, Jean Christophe Marechal<sup>1</sup>, Bernard Ladouche<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Montpellier

Dans cette étude, l'impact du changement climatique sur la ressource en eau du système karstique du Lez pompé pour l'AEP de l'Agglomération de Montpellier a été évalué à l'aide d'un modèle hydrogéologique global semi-distribué. Une modélisation inverse a été menée au moyen de fonctions de transfert de façon à prendre en compte l'existence de plusieurs compartiments hydrogéologiques et la sollicitation du système karstique par les pompages. 9 scénarios climatiques issus de modèles

climatiques forcés avec le scénario d'émission  $\text{A1B}$ , et désagrégées par la méthode « type de temps » du CERFACS ont été utilisés. Les scénarios climatiques choisis couvrent deux périodes temporelles, l'une pour le présent (1971-2000) et l'autre pour le futur (2045-2065). Ces scénarios projettent une augmentation de la température moyenne mensuelle comprise entre  $+1,5^{\circ}\text{C}$  et  $+2,3^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ) suivant la période de l'année (moyenne multi-modèle). Pour la pluie, une tendance à la diminution des cumuls pourrait se dessiner de l'ordre de 10 % à l'échelle annuelle. La recharge par la pluie efficace calculée par le modèle hydrogéologique pourrait fortement diminuer dans le futur, pour atteindre -30% du cumul annuel moyen de pluie efficace. La diminution de la recharge se traduirait par une augmentation de la durée des assèchs de la source du Lez ainsi que par une diminution du débit moyen de débordement de la source, en période de hautes eaux. Lors des périodes estivales (assèchs), les niveaux piézométriques seraient plus fréquemment situés sous les niveaux actuels. Toutefois, en maintenant le taux de pompage actuel, le niveau piézométrique retrouverait chaque année le niveau de débordement de la source (à 65 m NGF).

#### 9.4.10 (o) Water exchanges between a saturated karstic conduit and its surrounding rock : Evidences from isotopes in water and groundwater flow modeling

Stephane Binet<sup>1</sup>, Emmanuelle Joigneaux<sup>2</sup>, Hélène Pauwels<sup>3</sup>, Patrick Albéric<sup>2</sup>, Ary Bruand<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement, Toulouse

<sup>2</sup>ISTO, Orléans

<sup>3</sup>BRGM, Orléans

The exchanges of water between the conduits and its surrounding rock in a karstic aquifer are key parameters to understand the changes of water quality at the outlet of these aquifers. The mechanisms controlling these exchanges under saturated conditions are explored using a 2D coupled continuum-conduit flow model (Feflow®). The flows in the conduits and in the surrounding rock are described by the Manning-Strickler equation and the Darcy law respectively. We choose fluid transfer conditions to describe the conduit boundaries, which imply that the hydraulic heads at the boundaries of the conduit are not fixed. Thus the model can calculate freely the amounts of water exchanged between the two domains.

Isotopic ( $18\text{dO}$  and  $2\text{H}$ ), discharge and water head measurements were conducted on the Val d'Orléans karstic aquifer (France), during the 2008 hydrologic cycle in aim to estimate at the outlet, the amount of water exchanged between the conduit and the surrounding rock and to confronted the observations with the numerical results.

The results show a spatial variability of the water exchanges from recharge to discharge areas that are controlled by the turbulent head loss in the conduit and by the boundary conditions. The confrontation with isotopic mixing calculation suggests that the point recharge in the conduit is the key factor to describe these exchanges. The amounts of exchanged water are significant only for rock hydraulic conductivities up to 10-5 m/s and if the recharge flow rate in the conduit is inferior to the maximum discharge capacity of the conduit. Point recharge flow rates control the observed transient changes of water exchanges between the two domains. The transient calculations evidence a zone where the water is mixed by the following flood, at the interface between the conduit and the rock.

#### 9.4.11 (o) Caractérisation de la dynamique des écoulements de la zone non saturée au cours d'un épisode de crue aux exutoires des aquifères karstiques. Application au BREO de Fontaine de Vaucluse - LSBB

Christophe Emblanch<sup>1</sup>, Aurore Perineau-Barbel<sup>1</sup>, Antoine Htich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EMMAH, Avignon

Le Bassin de Recherche, d'Expérimentation et d'Observation de Fontaine de Vaucluse - Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (Fdv - LSBB) est un observatoire en environnement qui inclut une des plus importantes sources karstiques d'Europe (la source de Fontaine de Vaucluse) et une galerie souterraine de 4 km de long, creusée au sein de la zone non saturée de cet aquifère. Selon les conditions de recharges du système, de 3 à 61 points s'écoulent au sein de cette galerie.

Depuis 2003, l'exutoire du système, la source de Fontaine de Vaucluse, et l'ensemble des écoulements du LSBB sont suivis d'un point de vue hydrodynamique et hydrochimique. Ces 10 ans de chronique recourent des conditions climatiques très différentes. L'étude croisée des écoulements au sein du LSBB avec le suivi réalisé à l'exutoire du système nous a permis de mettre en évidence des mécanismes de genèse de crue, variables en fonction de la période climatique étudiée, mais également en fonction de la position de l'évènement pluvieux ayant généré cette crue au sein du cycle hydrologique étudié. La non linéarité de la réponse des aquifères karstique classiquement observées aux exutoires a pu être non seulement mise en évidence, mais une caractérisation de celle-ci a également pu être faite.

Le LSBB étant un site quasi unique, dans un but de généralisation de nos résultats, l'étude croisée des types d'écoulement observés au LSBB avec l'exutoire de la Fontaine de Vaucluse doit également, à terme, nous permettre de proposer une méthodologie d'identification de ces types d'eau, uniquement à partir de suivis à l'exutoire, en utilisant des données hydrodynamiques et hydrochimiques.

#### 9.4.12 (o) Etude des processus d'écoulement dans un petit système karstique Jurassien : apport du traçage naturel (éléments majeurs, traces et carbone organique) dans un suivi de crue (Fertans, France)

Sophie Denimal<sup>1</sup>, Marc Steinmann<sup>1</sup>, Catherine Bertrand<sup>1</sup>, Jacques Mudry<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Chrono-environnement, Besançon

Le système karstique de Fertans est localisé dans le Jura français et est intégré au dispositif Jurassien Karst (SO Karst et SO RBV). Ce site est constitué d'une série tabulaire de calcaires récifaux surmontant des marnes et des calcaires marneux oxfordiens, découpée par des failles. L'accès à cette série en falaise a permis d'équiper la zone non saturée (ZNS) par forage et la zone noyée (ZN) du karst (source drainant une fracture). Des sondes permettent la mesure en continu de la pression, la température et la conductivité électrique, et des échantillonneurs automatiques d'eaux donnent accès à un suivi chimique en éléments majeurs, traces et en carbone organique. Des plaques lysimétriques disposées sur le bassin versant permettent d'accéder à la signature hydrochimique de la zone d'infiltration. L'équipement du site permet donc de caractériser la contribution de chaque compartiment du karst aux transferts en fonction du régime hydrologique. Une crue a ainsi pu être suivie en Juin 2012 et a permis, grâce notamment à l'utilisation de marqueurs de l'infiltration (COT, Fe, Al, NO<sub>3</sub>) et du temps de résidence (Mg) d'une part de montrer la réponse rapide du système karstique à

l'évènement pluvieux et d'autre part de caractériser la réponse de la ZN et de la ZNS. Le signal hydrochimique de la crue se marque, pour la ZN, par une augmentation sensible de la concentration en COT, Fe et Al couplée à une diminution de la concentration en Mg marquant ainsi l'arrivée d'une eau d'infiltration rapide, 5 h après le début de l'épisode pluvieux. La ZNS montre un effet piston marqué (eaux anciennes riches en Mg) et une signature chimique de crue atténuée et décalée dans le temps (22 h) marquant le mélange eaux anciennes-eaux nouvellement infiltrées ainsi que l'inertie importante de la ZNS. Les nitrates montrent quant à eux un comportement contrasté marqué par une diminution dans la ZN et une augmentation dans la ZNS au moment de la crue.

#### 9.4.13 (p) Suivi en continu de la MOD fluorescente à l'aide d'un fluorimètre GGUN (Albillia SARL). Implication pour le suivi d'un traçage artificiel

Xavier Durepaire<sup>1</sup>, Christelle Batiot-Guilhe<sup>1</sup>, Vincent Bailly-Comte<sup>2</sup>, Pascal Brunet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hydrosciences Montpellier

<sup>2</sup>BRGM, Montpellier

Les fluorimètres de terrain de type GGUN (Albillia SARL) permettent de mesurer in situ la fluorescence d'une eau en continu. Ils sont aujourd'hui très largement utilisés pour instrumenter des exutoires karstiques. Dans le cadre d'un traçage artificiel, le GGUN permet de suivre la restitution d'au plus trois traceurs, une optique permet également le suivi de la turbidité. D'après des études récentes, ils permettraient de suivre les variations de Matière Organique Dissoute (MOD) fluorescente, traceur naturel des eaux d'infiltration. D'autre part, la MOD fluorescente et la turbidité, de par leurs variations naturelles, peuvent perturber la mesure de la restitution d'un traceur artificiel. Dans le but de mieux comprendre le fonctionnement du GGUN et d'optimiser le suivi de la fluorescence naturelle et artificielle aux émergences karstiques, des fluorimètres ont été installés au niveau de deux exutoires karstiques appartenant au SO karst (<http://www.sokarst.org/>) à la source du Lez depuis avril 2010 et à la Fontaine de Nîmes depuis juin 2012. Parallèlement à ce suivi in situ, un suivi régulier (bimensuel à journalier en crue) de la fluorescence naturelle par spectrofluorimétrie 3D a été réalisé pour le suivi de la MOD fluorescente à la source du Lez, complété par quelques prélèvements ponctuels à la Fontaine de Nîmes. La comparaison de ces deux types de suivis démontre qu'il est possible de suivre en continu les variations des différents composés de la MOD aux deux émergences karstiques. Ces résultats permettent également de mieux comprendre la dynamique des signaux d'origine naturelle mesurés par les optiques du GGUN. Ainsi, dans le cas d'une restitution de traceur artificiel influencée par l'évolution du bruit de fond, il devient possible de simuler précisément le signal qui aurait été mesuré en l'absence de traceur pour s'affranchir de son influence sur la courbe de restitution.

#### 9.4.14 (p) Etude de la dynamique des écoulements et du dioxyde de carbone dans la zone d'infiltration d'un système karstique : application au site de la grotte de Lascaux (France)

Nicolas Houillon<sup>1</sup>, Roland Lastennet<sup>1</sup>, Alain Denis<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire I2M GCE, Talence

Les attentes scientifiques concernant l'étude du karst reposent pour partie sur la compréhension du fonctionnement hydrodynamique et hydrogéochimique de la zone d'infiltration du fait de son rôle majeur dans la recharge des aquifères karstiques. S'ajoute un intérêt grandissant pour

la compréhension de la dynamique du CO<sub>2</sub> dans cette zone que ce soit du point de vue de la détermination du potentiel de karstification, de l'étude des transferts de CO<sub>2</sub> naturel ou anthropique (stockage profond du CO<sub>2</sub>), mais également de la conservation des cavités ornées. Les objectifs de cette étude sont de comprendre les transferts hydriques dans la zone subsurface du karst, les transferts de carbone organique et inorganique dans la zone vadose et la dynamique du CO<sub>2</sub>. La zone d'infiltration étudiée est celle dans laquelle se développe la grotte de Lascaux où des écoulements sont observés avec en particulier une émergence épikarstique. En complément des mesures déjà existantes dans la cavité, un dispositif de suivi en continu des paramètres physico-chimiques (conductivité, pH, température, O<sub>2</sub> dissous) et de la fluorescence de la matière organique des eaux est mis en place. En parallèle, des prélèvements et analyses hydrochimiques hebdomadaires sont réalisés (ions majeurs, isotopes naturels de l'eau, delta 13C, carbone organique). A l'extérieur de la cavité, des prélèvements hebdomadaires de pluies (ions majeurs, isotopes naturels de l'eau), ainsi que des eaux d'infiltration du sol grâce à deux lysimètres (ions majeurs, carbone organique) sont effectués. Les résultats montrent qu'au cours des crues, on peut différencier dans les écoulements, des eaux à plus ou moins longs temps de séjour. Ces eaux possèdent des pCO<sub>2</sub> à saturation vis-à-vis de la calcite élevées qui témoignent d'une pCO<sub>2</sub> importante (>5%) dans les horizons traversés. Cette dernière reste supérieure aux mesures mensuelles des pCO<sub>2</sub> réalisées dans les sols (calcisols leptiques : 3,9% / luvisols typiques : 1%). Des mesures en continu dans les calcaires et formations sablo-argileuses à différentes profondeurs devraient permettre de comprendre et de modéliser la dynamique du CO<sub>2</sub> dans la zone d'infiltration ainsi que le rôle des écoulements dans ces processus.

#### 9.4.15 (p) Comportement transmissif et capacitif de la zone non-saturée des calcaires dévoniens de Belgique : implications pour le fonctionnement l'aquifère épikarstique

Amaël Poulain<sup>1</sup>, Gaëtan Rochez<sup>1</sup>, Isabelle Bonniver<sup>1</sup>, Vincent Hallet<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Département de Géologie, Université de Namur, Belgique

La partie superficielle d'un substratum rocheux est habituellement dénommée en tant que zone épikarstique. Cette zone, d'avantage altérée et fracturée, possède une porosité et une perméabilité accrue vis-à-vis des formations géologiques « saines » sous-jacentes. Ce faisant, elle peut contenir une certaine quantité d'eau, proche de la saturation, constituant un aquifère épikarstique au sein de la zone non-saturée. Les caractéristiques en termes transmissif et capacitif de cette zone non-saturée sont mal connues, essentiellement par manque de données d'observation directes de ce milieu et suite à sa très forte hétérogénéité. Un moyen d'en étudier le comportement est la mesure des écoulements dans le karst de la zone non saturée, notamment via les percolations de spéléothèmes. De nombreuses études récentes ont déjà utilisé cette démarche dans le but d'appréhender les processus au sein de la zone vadose. Notre premier objectif a été d'appliquer ce genre de méthodologie à l'échelle de la Belgique. Étant donné que les calcaires paléozoïques de Wallonie sont les réserves principales d'eau potable en Belgique, il est essentiel de comprendre le fonctionnement de tels aquifères afin d'estimer leur vulnérabilité. Dans l'optique de collecter suffisamment de données pour permettre de réaliser des comparaisons avec des données historiques issues d'autres régions, des dispositifs de mesure ont été installés dans le karst de Han-sur-Lesse depuis 2008. Le système expérimental mis en place a permis d'estimer le débit écoulé de façon journalière. Une chronique de 6 années de débits est disponible et montre des caractéristiques inédites ainsi qu'une corrélation interannuelle évidente. L'objectif poursuivi dans le cadre de cette étude est de tenter de conceptualiser le fonctionnement de la zone vadose en interprétant la transformation du signal des précipitations en un signal de percolation stalactitique. Cette étude

est menée dans le cadre du projet Karst Aquifer ReseArch by Geophysics, qui vise à appréhender la dynamique des eaux en zone non-saturée par le couplage des méthodes géophysiques et hydrogéologiques. Ce projet de 4 ans, financé par le Fond National de la Recherche Scientifique, est mené conjointement par l'Université de Mons, l'Observatoire Royal de Belgique et Université de Namur.

#### 9.4.16 (p) Caractérisation multi-échelles des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère du Lez

Amélie Dausse<sup>1</sup>, Hervé Jourde<sup>1</sup>, Véronique Léonardi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hydrosciences Montpellier

Du fait de leurs hétérogénéités, les aquifères karstiques présentent de fortes disparités dans leurs propriétés hydrodynamiques. Les contrastes de connectivité ainsi que l'existence de chemins d'écoulement préférentiels à grande échelle ne permettent pas de définir d'échelle à laquelle les propriétés hydrodynamiques moyennes sont stationnaires. Il est donc essentiel d'appréhender l'organisation des écoulements ainsi que l'agencement des propriétés hydrodynamiques à différentes échelles pour définir le fonctionnement hydraulique des milieux karstiques.

Dans cette étude, les propriétés hydrodynamiques d'un karst et leur évolution au cours du temps sont estimées à l'échelle régionale par analyse des interférences liées aux pompages à l'exurgence principale (source du Lez, AEP de Montpellier). A l'échelle d'un site expérimental (1500 m<sup>2</sup>, différents tests hydrauliques ont été réalisés pour déterminer les propriétés hydrodynamiques à l'échelle locale et celle du forage.

A l'échelle régionale, on observe une compartimentation hydraulique de l'aquifère karstique, dépendante de l'hétérogénéité structurale et des conditions hydrologiques. A l'échelle du site, les tests d'interférences et les traçages mettent en évidence une chenalisation des écoulements ainsi qu'une grande disparité des connectivités hydrauliques entre les différents forages et le drain principal. A l'échelle du forage, les essais entre obturateurs ont révélés une gamme étendue de propriétés hydrodynamiques. Il est montré que la direction des écoulements ainsi que les propriétés hydrodynamiques varient en fonction des niveaux d'eau.

#### 9.4.17 (p) Understanding hydrodynamic processes and particle transfer in karst using Ensemble Empirical Mode Decomposition

Nicolas Massei<sup>1</sup>, Matthieu Fournier<sup>1</sup>, Jean-Paul Dupont<sup>1</sup>, Abderrahim Jardani<sup>1</sup>, Nicolas Lecoq<sup>1</sup>, Léa Duran<sup>1</sup>

<sup>1</sup>M2C, Université de Rouen

Karst hydrosystems are highly non-linear systems as a result of the complexity of their internal structure. For those reasons, their response to external inputs is also non-stationary. Time series and spectral approaches constitute useful tools for extracting internal components explaining the variability of time series recorded at karst hydrosystems in order to understand their dynamics and functioning. However, finding physically realistic interpretations may not be straightforward, for those methodological approaches are not physically-based. Fourier spectral, continuous or discrete multiresolution wavelet decomposition provide means for achieving extraction of internal components of hydrological time series. More recently, the Hilbert-Huang transform, combining (ensemble) empirical mode decomposition or (E)EMD and the Hilbert transform, was developed to investigate non-linear and non-stationary natural processes. EEMD is a multiresolution auto-adaptive approach which allows for an orthogonal decomposition of a given signal allowing a physically more realistic decomposition than wavelet multiresolution approaches, for instance. Here we propose an application of EEMD to the characterization of karst hydrological signals. EEMD is applied to water level

and turbidity in a well drilled in the karstified chalk under the Seine alluvium and to a spring at the foot of the chalk plateau nearby. The result emphasize the capability to extract components of water level related to karst-conduit flow, pumping and tidal variability. It also provides information about the impact of the corresponding hydrodynamics on turbidity variations at the well. At the spring, EEMD successfully allo-

wed for extracting a karst-conduit flow component of water level that matches turbidity variations. Another internal variability corresponding to a lower-frequency response of the surrounding aquifer unrelated to turbidity at the spring is also detected, likely related to matrix/fissured response and/or delayed infiltration through surficial formations on the plateau acting as a perched aquifer.

## Thème 10

# Grands programmes, grands projets, grands instruments, thèmes transverses - *Large programs and projects, large instruments, transverse themes*

Animateurs : Daniel Brito (LFC-R, Pau), Marie-Pierre Isaure (IPREM, Pau)

### 10.1 Les Très Grands Instruments au service des Sciences de la Terre : avancées récentes et développements analytiques (SFMC)

(Large-scale analytical facilities for the Earth Sciences : recent advances and analytical developments) (SFMC)

Responsables :

- Emmanuel Doelsch (CIRAD, Aix en Provence)  
doelsch@cirad.fr
- Jean-Louis Hazemann (Institut Néel, Grenoble)  
jean-louis.hazemann@grenoble.cnrs.fr
- Stéphanie Rossano (Géomatériaux, Marne la Vallée)  
rossano@univ-mlv.fr

Résumé :

Des développements analytiques récents en spectroscopie (XAS, infrarouge, STXM, inélastique neutron et X), imagerie (micro tomographie NanoSIMS, micro spectroscopie-diffraction) adossées à de Très Grands Instruments (TGI : synchrotron, nanoSIMS, neutrons, micro-sonde nucléaire...) permettent des avancées significatives en Sciences de la Terre.

Les TGI offrent, par exemple, la possibilité d'étudier ex situ des éléments présents à l'état de traces dans l'environnement, de caractériser des objets peu ou mal cristallisés ou d'acquérir des données in situ en reproduisant les conditions extrêmes (température, pression) rencontrées en Sciences de la Terre et de l'Univers.

Les TGI sont donc des lieux d'émulations scientifiques interdisciplinaires en constante évolution. L'objectif de cette session est de faire l'état de l'art sur les avancées récentes et les développements analytiques réalisés au sein des TGI au travers d'exemples d'application issus des Sciences de la Terre.

**Abstract :**

Some recent analytical developments in spectroscopy (XAS, infrared, STXM, inelastic neutron and X), imagery (microtomography NanoSIMS, microspectroscopy-diffraction) backed by some Large-Scale analytical Facilities (LSF : synchrotron, nanoSIMS, neutrons, nuclear microprobe, etc.) are leading to some significant advances in the Earth Sciences. For instance, LSFs offer the possibility of in situ studies of elements existing in the environment in trace state, of characterizing non-crystallized or poorly crystallized objects, or of acquiring data in situ by reproducing the extreme conditions (temperature, pressure) encountered by the Earth and Universe Sciences.

LSFs are therefore places of constantly evolving interdisciplinary scientific emulations. The purpose of this session is to determine the state of the art with the recent advances and analytical developments achieved within VLIs through some application examples derived from the Earth Sciences.

### 10.1.1 (o) Les développements en cours sur les microsondes ioniques CAMECA IMS 1270 et IMS 1280HR2, instruments nationaux de l'INSU

Etienne Deloule<sup>1</sup>, le groupe microsonde ionique du CRPG<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CRPG, Nancy

Les microsondes ioniques IMS 1270 et IMS 1280 HR2 installées au CRPG sont des Instruments Nationaux de Géochimie de l'INSU. Ce sont des spectromètres de masse d'ions secondaires (SIMS) de grand rayon, capables de réaliser des analyses in-situ avec une résolution spatiale de quelques  $\mu\text{m}$ , à haute résolution de masse avec une grande sensibilité et une grande dynamique. Ces instruments sont donc accessibles en service national, sous la responsabilité de l'INSU (Groupe ad hoc Géochimie).

En service national depuis bientôt 15 ans, l'IMS 1270 aura subi à l'automne 2014 une jouvence complète; la transformant en IMS 1280. L'IMS 1280 HR2, installé en 2010 au CRPG est un prototype de sonde à très haute résolution ( $M/\Delta M \approx 40\,000$ ) en cours de développement.

Au cours des années écoulées, différents types d'analyses ont été développés et mis à disposition des utilisateurs, couvrant différents domaines des géosciences, tels que :

- mesure des isotopes du plomb, des éléments et des composés nécessaires aux datations U/Pb sur zircons, monazite, uraninite,...
- mesure des isotopes de l'oxygène sur différentes matrices (carbonates, silicates, oxydes...)
- Mesure des isotopes du Magnésium et datation <sup>26</sup>Al-<sup>26</sup>Mg.
- mesure des isotopes du carbone sur carbonates et matière organique
- mesure des isotopes du soufre sur sulfures et sulfates
- mesure des isotopes de l'hydrogène, lithium et du bore
- mesure des teneurs en éléments volatiles (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, F, Cl, S) dans les minéraux et inclusions magmatiques.

Le développement de matériaux de référence pour ces analyses est une quête perpétuelle. Nos efforts actuelles portent sur le développement de la mesure précise des fractionnements indépendants de la masse  $\Delta^{17}\text{O}$ ,  $\Delta^{33}\text{S}$  ou  $\Delta^{36}\text{S}$  ou des radioactivités éteintes ( $\Delta^{26}\text{Mg}$ ), de la mesure des éléments courtes périodes de la série de l'Uranium (<sup>238</sup>U-<sup>234</sup>U-<sup>230</sup>Th-<sup>226</sup>Ra), et de la mesure isotopique des éléments de masse intermédiaire (de Fe à Zr).

### 10.1.2 (o) Les éléments légers vus par microsonde nucléaire : applications pour les Sciences de la Terre

Hicham Khodja<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Etudes des Eléments Légers, Gif sur Yvette

Les Sciences de la Terre constituent une des principales disciplines scientifiques qui font appel à des caractérisations par microsonde nucléaire. Cet instrument permet en effet d'accéder à un grand nombre de techniques de dosage quantitatif, local et non destructif (PIXE, PIGE, RBS, NRA, ERDA). Celles-ci permettent de couvrir la totalité de la classification périodique. Particulièrement intéressés au LEEL par le rôle et le comportement des éléments légers dans les matériaux, nous exploitons pour nos recherches propres comme pour la communauté scientifique une microsonde nucléaire qui offre des possibilités de caractérisation pour cette gamme d'éléments avec des techniques poussées à leurs limites.

Après un bref survol des caractéristiques principales du panel de techniques disponibles, ainsi qu'un panorama des principales applications

dans le domaine des Sciences de la Terre, nous présenterons les différents projets en cours qui visent à améliorer la sensibilité des différentes spectrométries mises en œuvre.

Bien que réputées insensibles à la spéciation du fait des énergies mises en jeu (sonde dans la gamme du MeV), certaines techniques utilisées dans des conditions particulières peuvent renseigner sur la nature des sites occupés par les éléments d'intérêt. Nous présenterons une perspective sur cet aspect.

### 10.1.3 (o) Micro et nano-tomographie RX en laboratoire : de nouveaux outils performants pour visualiser et analyser en 3D la structure interne de matériaux à différentes échelles spatiales

Daniel Borschneck<sup>1</sup>, Perrine Chaurand<sup>1</sup>, Clément Levard<sup>1</sup>, Nathan Bossa<sup>1</sup>, Jeanne Perrin<sup>2</sup>, Wei Liu<sup>1</sup>, Pierre Rochette<sup>1</sup>, Jérôme Rose<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEREGE, Aix-en-Provence  
<sup>2</sup>IMBE, Marseille

La tomographie à rayons X, technique d'imagerie 3D non destructive, permet de sonder le cœur de matériaux et d'en évaluer les structures internes et les différences de densité et de composition. Son principe repose sur l'acquisition de radiographies 2D à différents angles dont les niveaux de gris traduisent pixel par pixel le coefficient d'atténuation local du faisceau RX, qui peut, après calibration, être exprimé en échelle de densité.

Les avancées technologiques récentes et en particulier les optiques performantes « zone plates » ont permis le développement d'une version haute résolution de la tomographe RX de laboratoire, c'est à dire avec une résolution spatiale sub-micronique et nanométrique (50 nm), actuellement accessible seulement en synchrotron. Dans le cadre de l'Equipex NanoID (ANR-10-EQPX-39-01), la plate-forme RX du CEREGE a acquis deux appareils innovants de micro et nano-tomographie RX, atteignant une résolution spatiale respectivement 0,8 mm et 50 nm.

Les types d'échantillons pouvant être analysés sont très variés, de matériaux denses comme les météorites ou le ciment, à des matrices avec un faible contraste d'absorption RX comme les tissus biologiques, dit tissus « mous », et ce grâce à deux modes d'analyses, respectivement contraste d'absorption et contraste de phase. Les applications sont également très variées. On peut principalement citer : (i) la localisation d'agrégats de nanoparticules dans des matrices complexes (matrices polymères, végétaux, organismes, cellules, bactéries ...), (ii) l'analyse de la porosité de matériaux (ciment, membrane de filtration, météorite, agrégats de sols ...) et (iii) l'étude de la morphologie d'échantillons (organismes, embryons, fossiles préhistoriques ...).

Les autres appareils de micro-analyses chimiques et minéralogiques de la plate-forme RX du CEREGE (micro-XRF, micro-XRD) ainsi que l'ICP-MS ablation laser complètent parfaitement les appareils d'imagerie 3D.

### 10.1.4 (o) Ultra high sensitivity X-ray Absorption Spectroscopy measurements in environmental and geochemical sciences : a new high resolution spectrometer on CRG-FAME beamline

Jean-Louis Hazemann<sup>1</sup>, William Del Net<sup>1</sup>, Isabelle Kieffer<sup>2</sup>, Eric Lahera<sup>2</sup>, Isabelle Llorens<sup>3</sup>, Olivier Proux<sup>2</sup>, Denis Testemale<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Néel, Grenoble  
<sup>2</sup>OSUG, Grenoble

<sup>3</sup>Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon, Lyon

The CRG-FAME beamline at ESRF is devoted to X-ray absorption spectroscopy (XAS). This technique allows to probe the speciation of a target chemical element (selected by the energy of its absorption edges), i.e., its electronic structure (the valence) and the structure of the coordination shells. FAME covers a wide variety of common applications of XAS in materials sciences, biophysics, chemistry and mainly in environmental and geochemical sciences.

Specificities of XAS measurements in the environmental and geochemical sciences fields are that the probed element is often diluted in the media and can present different environments in the same sample. On FAME, fluorescence-XAS measurements are routinely achieved using a 30-element Ge Solid State Detector (SSD) with a detection limit around 50ppm. A way to improve significantly this detection in term of dilution and discrimination of speciation is to use instead a crystal analyzer spectrometer (CAS) to perform High Energy Resolved Fluorescence Detection (HERFD) acquisitions. A five crystals focusing CAS has been built for this purpose and is open to users since 2012.

XAS acquisitions on dilute elements can now be performed in all type of matrices, even if its main constituents are excited by the X-ray beam (i.e. in such a case the SSD would be saturated by the matrix signal). For example Co speciation on Fe-rich materials can be probed, even if the Fe K $\beta$  lines are very close in energy to the Co K $\alpha$  ones. HERFD-XAS spectra can be also obtained with a better resolution close to the absorption edge, giving an improvement in the discrimination of the speciations. Differentiation between Ce(III) and Ce(IV) in CeO<sub>2</sub> aged nanomaterials can be problematic in standard XAS measurement. HERFD measurements allow to accurately and unambiguously precise the Ce(III)/Ce(IV) speciation.

Ongoing technological developments of the beamline will be presented as well as illustrations of the scientific possibilities offered by this CAS.

### 10.1.5 (o) The ID21 beamline at the European Synchrotron Radiation Facility : an ideal tool for investigations in the Earth Sciences

Camille Rivard<sup>1</sup>, Marine Cotte<sup>1,2</sup>, Murielle Salomé<sup>1</sup>, Hiram Castillo<sup>1</sup>, Barbara Fayard<sup>1,2,3</sup>, Emeline Pouyet<sup>1</sup>, Bernhard Hesse<sup>1</sup>, David Bugnazet<sup>1</sup>, Eric Gagliardini<sup>1</sup>, Gilles Berruyer<sup>1</sup>, Jean Susini<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ESRF, Grenoble

<sup>2</sup>Laboratoire d'archéologie moléculaire et structurale, Paris

<sup>3</sup>Laboratoire de Physique des Solides, Orsay

The ID21 is a beamline dedicated to micro-X-ray fluorescence ( $\mu$ -XRF) and micro-X-ray absorption spectroscopy ( $\mu$ -XAS) in the tender X-ray domain from 2 to 9.2 keV (Salomé et al. 2013). The beamline is appropriate for localization and speciation of elements of high relevance in Earth Sciences, giving access to the K-edges of P to Cu elements, and to the L- and M-edges of some heavier elements.

The X-ray beam can be focused (KB mirrors or zone plate) to achieve a beam spot of about 0.3 x 0.6 (V x H)  $\mu$ m<sup>2</sup> with a high flux (more than 5.1010ph/s). Collection of  $\mu$ -XRF maps evidences the spatial distribution of the elements and  $\mu$ -XAS, acquired on selected points of interest, provides the oxidation state and the local site geometry of the investigated atoms (information on oxidation state ratio, identification of minerals). Complementary detectors are available for transmission or X-ray fluorescence mode and enable the study of a large variety of samples in terms of concentration (few ppm to percents) and matrix. The setup can be used, for example, to access Fe and S oxidation state in volcanic glass and crystals, or P status in sediments or undisturbed soils.

The recently developed XANES full-field imaging station (Fayard et al. 2013) allows for the speciation of an element of interest over a 2D field of view. Up to 4.106 XANES spectra can be simultaneously acquired over large field of view (from 600  $\mu$ m to 2 mm) with sub-micron spatial

resolution (from 0.3 to 1.4  $\mu$ m). Using an unfocused beam, transmitted radiographies of the sample are collected with a CCD camera, along the XANES energy range. This setup is particularly well adapted to assess the spatial distribution of species in undisturbed rock samples, at natural/engineered interfaces or to determine status of elements in small crystals dispersed in a matrix.

Relevant scientific examples covering different fields of Geosciences will be presented to illustrate the capabilities of these setups.

Additionally, ID21 has a Synchrotron Radiation-based FTIR end-station that can provide complementary molecular mapping.

The current development of a  $\mu$ -XRD end-station on a side branch will make ID21 a multi-techniques platform especially well adapted for  $\mu$ -analyses in Earth Sciences.

Fayard B. et al. (2013). J. Phys. : Conf. Ser. 425 192001

Salomé M. et al. (2013) J. Phys. : Conf. Ser. 425 182004

### 10.1.6 (o) LUCIA, the SOLEIL beamline dedicated to $\mu$ XAS- $\mu$ XRF in the tender X-ray domain

Delphine Vantelon<sup>1</sup>, Nicolas Trcera<sup>1</sup>, Damien Roy<sup>1</sup>, Benedikt Lassalle<sup>1</sup>, Pierre Lagarde<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Synchrotron SOLEIL, Gif-sur-Yvette

The LUCIA beamline (Line for Ultimate Characterization by Imaging and Absorption) [1] is dedicated to experiments of micro X-ray absorption ( $\mu$ XAS) and micro X-ray fluorescence ( $\mu$ XRF) in the so-called tender x-rays range (currently 0.8 - 8 keV). This energy domain offers the possibility of determining the speciation (local chemistry, quantitative determination of the local geometric structure around the absorbing atom) of elements performing XAS experiments at the K-edge from sodium (Na) to iron (Fe), the L-edges of Nickel (Ni) to gadolinium (Gd), as well as the M-edges of rare earths and actinides.

On LUCIA, these two non-destructive techniques can be combined on heterogeneous samples to achieve maps of elements distribution at the scale of the photons spot size (2, 5 x 2, 5 microns), and describe the local environment around these elements. The two  $\mu$ XRF and  $\mu$ XAS techniques can be combined with other micro-spectroscopy such as Raman, providing simultaneous access to additional structural information, at the same location.

These specificities single out the LUCIA beamline in the international community and find a large panel of applications in many scientific domains, among which the field of geosciences is one of the major.

This scientific community will soon have the opportunity to make use of new developments of the beamline that are currently under progress, for novel applications :

1/ the extension of the spectral range covered by the line towards low energies (currently 600 eV). It is now possible to reach the L-edges of additional transition elements such as Fe and Mn (in addition to the K-edges already measurable).

2/ the acceleration of data acquisition. As an example, it will offer the possibility to study phase evolutions during (slow) kinetics experiments.

3/ the upgrade of an ultrahigh vacuum vessel. First dedicated to surface sciences, combining SEXAFS with LEED and Auger measurements, the vessel is expected to find wider applications allowing studies of samples in a clean, controlled atmosphere.

Those developments will be illustrated with selected scientific examples.

[1] A.-M Flank, G. Cauchon, P. Lagarde, S. Bac, M. Janousch, R. Wetter, and J.-M. Dubuisson., F. Langlois, M. Idir, T. Moreno, D. Vantelon, LUCIA, A Microfocus soft XAS beamline, NIM in Physics Research B, 246 p. 269-274 (2006)

### 10.1.7 (o) Carbonate mineral nucleation in nanopores and on flat surfaces : Understanding interfacial energy controls

Alejandro Fernandez-Martinez<sup>1</sup>, Andrew Stack<sup>2</sup>, Qingyun Li<sup>3</sup>, Yandi Hu<sup>3</sup>, Young-Shin Jun<sup>3</sup>, Glenn Waychunas<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>2</sup>Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, États-Unis

<sup>3</sup>Washington University in St Louis, St. Louis, États-Unis

<sup>4</sup>Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, États-Unis

Mineral trapping is expected to be one of the key mechanisms ensuring safe and permanent storage of CO<sub>2</sub> in sub-surface environments, in the form of carbonate minerals. However, although carbonates are very common minerals in nature, a large number of unknowns remain to be solved about their nucleation pathways and about how these are affected by the extreme physico-chemical conditions found in CO<sub>2</sub> storage geological reservoirs.

Many of the reservoirs that have been selected as possible hosts for CO<sub>2</sub> sequestration initiatives are geologic formations composed mainly by sandstones. Our experiments have been designed to study the reactivity of the minerals composing these rocks towards the nucleation of carbonates. Heterogeneous nucleation experiments performed using a novel synchrotron grazing-incidence small angle X-ray scattering (GISAXS) technique in aqueous solutions have shown that quartz and mica, the dominant minerals in reservoir and cap-rocks, respectively, are reactive substrates for the nucleation of CaCO<sub>3</sub>.

One of the key characteristics of these reservoirs is the presence of a porous media that confines the geological fluid. Experimental and theoretical studies will be presented aimed to understand how this confinement affects nucleation, and how these pores are available or not as nucleation sites. Neutron and X-ray scattering experiments have shown that, while nucleation of CaCO<sub>3</sub> in raw silica nanopores is prevented, modification of the pore surface chemistry via surface functionalization enhances nucleation in the functionalized nanopores. X-ray techniques useful to probe specifically chemistry in the nanopores will be described.

### 10.1.8 (o) Diffusion of silver nanoparticles at the bacteria biofilm/mineral/water interface

Alexandre Gelabert<sup>1</sup>, Clément Levard<sup>2</sup>, Georges Ona-Nguema<sup>3</sup>, Morgane Desmau<sup>1</sup>, Melanie Auffan<sup>2</sup>, Jérôme Rose<sup>2</sup>, Jérôme Labille<sup>2</sup>, Yann Sivry<sup>1</sup>, Peter Eng<sup>4</sup>, F. Marc Michel<sup>5</sup>, François Guyot<sup>3</sup>, Marc Benedetti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>3</sup>IMPMC, Paris

<sup>4</sup>Consortium for Advanced Radiation Sources, University of Chicago, États-Unis

<sup>5</sup>Virginia Tech Geosciences, Virginia Polytechnic Institute and State, États-Unis

The production volume of manufactured nanoparticles (NPs) in 2010 was estimated around 285,000 metric tons. As highlighted in recent studies, a significant fraction of them is likely to be released in soils and waters, raising important concerns regarding their impact on ecosystems and human beings. In natural systems, the NPs fate is expected to be controlled by their interactions with minerals. However, most of the mineral surfaces are coated by microbial biofilms, resulting in an extremely complex interface that exhibits highly specific physico-chemical properties, but relatively few studies have explored reactions occurring in this key environmental compartment. Therefore, the main goal of this research is to understand how NPs size, structure, and composition control their diffusion at the biofilm/mineral/water interface.

Shewanella oneidensis MR1 biofilms grown on oriented single crystals (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001) and (1-102)) were exposed to Ag NPs. Their partitioning at this complex interface was measured in situ using X-ray Standing Waves technique. To determine the role of the NPs overall charge for their reactivity, 3 different coatings representative of manufactured NPs have been tested : one inorganic negative (SiO<sub>2</sub>) and positive (SiO<sub>2</sub>-NH<sub>2</sub>) coatings, and one organic negative coating (PVP). Experimental results show an important difference in partitioning as a function of mineral and NPs coating types. While the negative SiO<sub>2</sub> coated NPs diffuse quickly (in less than 30 min) through the negatively charged biofilm to the positively charged mineral surface, the positive SiO<sub>2</sub>-NH<sub>2</sub> coated NPs remain trapped in the biofilm matrix. The negative PVP NPs, exhibiting an organic coating, display an intermediate behaviour, demonstrating the importance of the coating type for NPs reactivity at this interface. Moreover, exposure kinetics is a key parameter, and significant differences in NPs profiles have been measured between 3 hours and 24 hours of exposure.

### 10.1.9 (o) Synthèse abiotique de molécules prébiotiques dans la lithosphère océanique : une approche multimodale par Techniques Synchrotron (SR-FTIR, SR-DUV), Microscopie Multiphoton et Tof-SIMS

Celine Pisapia<sup>1,2</sup>, Bénédicte Ménez<sup>2</sup>, Frederic Jamme<sup>1</sup>, Matthieu Refregiers<sup>1</sup>, Muriel Andreani<sup>1</sup>, Paul Dumas<sup>1</sup>, Valerio Pasini<sup>2,4</sup>, Quentin Vanbellingen<sup>5</sup>, Daniele Brunelli<sup>4</sup>, Alain Brunelle<sup>5</sup>, David Touboul<sup>5</sup>

<sup>1</sup>SOLEIL Synchrotron, Gif-sur-Yvette

<sup>2</sup>IPG Paris

<sup>3</sup>Laboratoire de Géologie de Lyon : terre, Planètes, Environnement

<sup>4</sup>Università degli studi di Modena e Reggio Emilia, Modena, Italie

<sup>5</sup>Institut de Chimie des Substances Naturelles, Gif-sur-Yvette

La serpentinisation de la lithosphère océanique, active depuis la Terre Primitive, est de plus en plus considérée comme capable de générer des conditions favorables à la synthèse de molécules organiques prébiotiques. En effet, l'hydratation par circulation hydrothermale de minéraux des roches ultramafiques s'accompagne de la production de grandes quantités d'hydrogène. Ce flux d'H<sub>2</sub> est le point clef de ces processus par sa capacité à réduire le CO<sub>2</sub> pour former des molécules organiques via des réactions de type Fischer-Tropsch ou Strecker, mais également en tant que source énergétique pour des écosystèmes chimio-lithotrophes de subsurface comparables aux écosystèmes primitifs. De plus, les conditions alcalines générées par la serpentinisation favoriseraient la stabilisation de ces potentielles premières briques du vivant au sein de la microporosité des roches, espace confiné ayant pu servir de template aux premières cellules vivantes.

Afin de caractériser ces microenvironnements, nous avons développé une approche multimodale à haute résolution, basée notamment sur des techniques synchrotron, permettant une échelle d'observation micro à nanométrique (SR-FTIR, SR-DUV, SEM/TEM, Microscopie Multiphoton, Tof-SIMS). Ceci nous a permis de caractériser et de discriminer l'origine biologique ou abiotique des phases organiques contenues dans les serpentinites à l'échelle du pore du minéral. Des microniches favorables au développement de microorganismes de subsurface ont ainsi pu être identifiées. Nous avons également mis en évidence, pour la première fois au sein d'échantillons naturels, la synthèse de molécules organiques abiotiques (ex : acides aminés) d'intérêt prébiotique. Ces molécules, piégées et stabilisées au sein de la nanoporosité des serpentinites, nous amènent à reconsidérer la possibilité de la formation des premières briques du vivant au sein de ces environnements de serpentinisation.

### 10.1.10 (o) Cadmium stress localization in the unicellular green alga *Chlamydomonas reinhardtii* at subcellular level by synchrotron-based techniques and nano-SIMS

Florent Penen<sup>1</sup>, Marie-Pierre Isaure<sup>1</sup>, Hiram Hiram Castillo-Michel<sup>2</sup>, Olivier Proux<sup>2</sup>, Etienne Gontier<sup>3</sup>, Julien Malherbe<sup>1</sup>, François Horreard<sup>4</sup>, François Hillion<sup>4</sup>, Dirk Dobritzsch<sup>5</sup>, Ivo Bertalan<sup>5</sup>, Dirk Schaumloeffel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LCABIE-IPREM, Pau

<sup>2</sup>ERSF, Grenoble

<sup>3</sup>Bordeaux Imaging Center

<sup>4</sup>Cameca, Gennevilliers

<sup>5</sup>Institute of Biochemistry and Biotechnology, Martin-Luther University Halle-Wittenberg, Halle, Allemagne

*Chlamydomonas reinhardtii* is well-known as an eukaryotic photosynthetic model for the studies of metal stress. This green micro-algae, living in the soil water, is tolerant to cadmium but the mechanisms involved in this tolerance are still unknown. The synthesis of thiolated peptides (phytochelatin, glutathione...) and the cell-wall could play an important role in its cadmium tolerance. In order to highlight these mechanisms, subcellular localization and speciation of cadmium were studied in different strains of *C. reinhardtii* by SR- $\mu$  XRF (Synchrotron Radiation micro X-Ray Fluorescence), XAS (X-Ray Absorption Spectroscopy including XANES (X-ray Absorption Near Edge Spectroscopy) and EXAFS (Extended X-Ray Absorption Fine Structure)) and  $\mu$  XANES. Sample preparation and synchrotron measurements were performed in cryogenic conditions to avoid metals redistribution and speciation changes. The informations collected about the intracellular cadmium ligands showed that sulfur ligands (thiol peptides) were not the only tolerance mechanism implemented by the cell. For cadmium localization,  $\mu$  XRF elemental maps were confronted to nanoSIMS (nanoscale Secondary Ionization Mass Spectrometry) elemental maps and its corresponding TEM (Transmission Electronic Microscopy) images. Finally, mapping results were compared with cadmium distribution after cellular fractionation. These complementary techniques showed that cadmium localization changed, depending on the *C. reinhardtii* strains and the cadmium concentrations.

### 10.1.11 (o) Rhéologie de l'olivine et de l'orthopyroxène aux conditions du manteau supérieur terrestre

Arnaud Proietti<sup>1</sup>, Frédéric Béjina<sup>1</sup>, Misha Bystricky<sup>1</sup>, Matthew Whitaker<sup>2</sup>, Haiyan Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IRAP, Toulouse

<sup>2</sup>Mineral Physics Institute, Stony Brook & National Synchrotron Light Source, Brookhaven National Laboratory, États-Unis

Une bonne compréhension de la rhéologie des roches qui composent le manteau terrestre est essentielle pour modéliser la dynamique interne de la Terre. Si de nombreuses études de déformation ont été réalisées sur l'olivine, l'effet de la pression sur ses propriétés rhéologiques reste très mal contraint. Les avancées technologiques récentes permettent maintenant d'obtenir des données rhéologiques aux pressions du manteau supérieur. Une difficulté de ces expériences est de pouvoir contrôler précisément les conditions de pression, température et fugacité en oxygène. L'orthopyroxène, pour sa part, reste encore très peu étudié.

Dans cette étude, nous avons déformé des agrégats synthétiques d'olivine et d'orthopyroxène aux conditions du manteau supérieur. Pour cela,

nous avons tout d'abord fait réagir dans des fours sous atmosphère contrôlée des poudres nanométriques d'oxydes de SiO<sub>2</sub>, MgO et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pour former des poudres d'olivine et de pyroxène. Nous avons ensuite densifié ces poudres par différentes techniques de frittage (Spark Plasma Sintering ou SPS et frittage sous vide) pour obtenir des échantillons denses avec des tailles de grains micrométriques et des microstructures homogènes. Enfin, ces échantillons ont été déformés dans une presse D-DIA de la ligne X17B2 du synchrotron NSLS de Brookhaven (NY), à des pressions comprises entre 3 et 6 GPa et des températures allant de 900 à 1200°C. L'analyse des données recueillies in situ par diffraction des rayons X et par radiographie nous a permis de mesurer les vitesses de déformation et l'état de contrainte dans les échantillons. Ces mesures indiquent un contraste de viscosité entre l'olivine et l'orthopyroxène qui varie en fonction des conditions P-T. Nous analysons par microscopie électronique les microstructures déformées afin de contraindre les mécanismes de déformation actifs lors de ces expériences. Nous présentons ces résultats ainsi que nos estimations de l'effet de la pression sur la rhéologie de ces minéraux.

### 10.1.12 (o) Elastic parameters of Fe-rich olivines

Nicolas Tercé<sup>1,2</sup>, Frédéric Béjina<sup>1</sup>, Micha Bystricky<sup>1,2</sup>, Matthew Whitaker<sup>3,4</sup>, Haiyan Chen<sup>3,4</sup>,

<sup>1</sup>IRAP, Toulouse

<sup>2</sup>Université Paul Sabatier-Toulouse III

<sup>3</sup>Mineral Physics Institute, Stony Brook University, États-Unis

<sup>4</sup>National Synchrotron Light Source, Brookhaven National Laboratory, États-Unis

Olivine is thought to be the most abundant mineral in the Earth's upper mantle and knowing its physical properties is essential for the understanding and modelling of the dynamics of terrestrial planetary interiors. While many equation of state (EoS) studies have been performed on Mg-rich olivines and on the Fe end-member of the olivine solid-solution, very few experiments have been performed on Fe-rich olivines. The goal of this study is to measure EoS of olivines with compositions ranging from [Fe<sub>0.4</sub>Mg<sub>0.6</sub>]SiO<sub>4</sub> to Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. Our olivine samples have been synthesized from nano-powders of elementary oxides mixed with the proper stoichiometries and reacted at room pressure and 1000°C under a controlled atmosphere close to the Fe/FeO buffer. The powders were then sintered using Spark Plasma Sintering in order to minimize the porosity of our samples. The resulting olivine aggregates have fairly homogeneous grain sizes from 300 nm to 3  $\mu$ m depending on their Fe content. Using these samples, high-pressure high-temperature experiments coupled with synchrotron X-ray diffraction were realized using the DIA apparatus at the X17B2 beamline of the National Synchrotron Light Source (NY, USA). Diffraction patterns were taken at various P, T conditions in order to determine the EoS of our Fe-rich olivines. Here we present preliminary results for [Fe<sub>0.6</sub>Mg<sub>0.4</sub>]SiO<sub>4</sub> obtained from room temperature data. We determined the cell volume, V<sub>0</sub>, bulk modulus, K<sub>T0</sub>, and its pressure derivative, K', by fitting a Birch-Murnaghan EoS : V<sub>0</sub> = 301.56 Å<sup>3</sup>, K<sub>T0</sub> = 132.4 GPa when K' is fixed to 4 (2nd order), and K<sub>T0</sub> = 128.3 GPa with K' = 6.3 (3rd order EoS). New estimates of elastic parameters of olivines with different Fe-content will also be presented.

### 10.1.13 (p) Applications of Atom Probe Tomography in Geological Science

François Horreard<sup>1</sup>, Thomas Kelly<sup>2</sup>, Peter Clifton<sup>2</sup>, David Reinhard<sup>2</sup>, Ty Prosa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Cameca, Gennevilliers

<sup>2</sup> Cameca Instruments, Madison, WI, États-Unis

Atom probe tomography (APT) [1] has proven to be valuable for characterization of a range of materials types. The classes of materials that can be studied with APT has been broadening markedly since the introduction of modern laser pulsing to APT instruments about 2005 [2,3]. Whereas simple materials like metal alloys and silicon structures were the earliest candidates for study, materials of ever-increasing complexity have been the object of APT analyses since that time. Compound semiconductors such as GaAs, GaN, InGaN quantum wells [4], CdTe solar cells [5], and oxide semiconductors. Synthetic ceramics, including SiO<sub>2</sub>, CrO<sub>2</sub>, FeO, and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, have been studied in the past six years [1].

These efforts clearly suggest feasibility for analyses of geological materials but it was not until the past two years that actual efforts were initiated. This presentation will provide an overview of the basic operating principles of APT. It will then examine the unique strengths and the limitations of APT for geological analysis. These include sub-nanometer compositional mapping, isotopic sensitivity, and high analytical sensitivity (<10 ppm). Recent example applications include :

- Zircon geochronology where U/Pb isotope dating has been shown to agree very well with SIMS data and nanoscale microstructural features have greatly enhanced the understanding of the material's history [6]

- Magnetite and hydroxyapatite minerals as models for biominerals [7] Other examples will be shown to highlight the types of information that can be obtained from APT.

[1] T.F. Kelly and D.J. Larson, *Ann. Rev. Mat. Sci.* (2012) 42, 1-31.

[2] B. Gault et al., (2006) *Rev. Sci. Instrum.* 77 :043705.

[3] J.H. Bunton et al. (2007) *Microsc. Microanal.* 13 :418-27.

[4] P.P. Choi et al. (2012) *Microsc. Today*, 20(3) :18 ?24.

[5] D.J. Larson et al., *Microsc. Microanal.* (2012) 18, 928-929.

[6] J.W. Valley et al., *Nature Geoscience* (2014).

[7] L. Gordon, Ph.D. thesis with D. Joester, Northwestern University (2014).

### 10.1.14 (p) A brighter O- source for the NanoSIMS ion microprobe

François Horreard<sup>1</sup>, François Hillion<sup>1</sup>, Dirk Schaumloeffel<sup>2</sup>, Julien Malherbe<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Cameca Industrie, Gennevilliers

<sup>2</sup> LCABIE-IPREM, Pau

The NanoSIMS is a secondary ion mass spectrometer for high precision isotopic and trace element measurements from sub-micron areas.

It includes a primary beam of reactive ions (Cs<sup>+</sup>, O<sup>-</sup>) at normal incidence with a normal co-axial secondary ion extraction and an objective lens at short working distance. This optimizes ionization yield, primary beam performance and ion collection. A double focusing Mattauch-Herzog-like magnetic sector mass analyzer incorporates a multi-collection of up to seven EMs or FCs.

The instrument has helped producing scientific results in earth & planetary sciences [2], materials, bio-geochemistry, cell biology and environment microbiology [3].

The vast majority of publications were based on detection of electro-negative elements or isotopes, sputtering the sample with cesium ions, with a spot size down to 50nm. Indeed the analysis of electropositive ions required the use of a duoplasmatron ion source in O- mode, with a much lower brightness than the cesium source. This limited the everyday lateral resolution to 300-400nm in O- mode. We present here the recent integration and characterisation of a RF-plasma ion source delivering O- primary ions. The demonstrated values of beam density and spot size are similar to the Cs<sup>+</sup>, opening new possibilities and new fields of research : alkalis, transition metals, REE, uraniumes will now be detectable and imaged at low concentration level with better than 50nm

lateral resolution. We will illustrate this development with some preliminary application examples in geosciences.

[1] Hydrogen Isotopes in Lunar Volcanic Glasses and Melt Inclusions Reveal a Carbonaceous Chondrite Heritage. A. E. Saal et al. *SCIENCE* 14 June 2013 : 1317-1320

[2] Zero-valent sulphur is a key intermediate in marine methane oxidation. J. Milucka et al. *NATURE* 491, 7Nov2012, 541-546.

[3] M. L. Steinhauser et al. Multi-isotope imaging mass spectrometry quantifies stem cell division and metabolism. 516, *NATURE*, Vol 481, 26 January 2012.

### 10.1.15 (p) Etude des premiers stades de l'altération de verres de compositions simplifiées

Stéphanie Rossano<sup>1</sup>, Nicolas Trcera<sup>2</sup>, Anne Perez<sup>1</sup>, Pascal Berger<sup>3</sup>, Eric Van Hullebusch<sup>1</sup>, Aurélie Verney-Carron<sup>4</sup>, Liliane Jean-Soro<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géomatériaux et Environnement, Marne-la-Vallée

<sup>2</sup> Synchrotron SOLEIL, Gif Sur Yvette

<sup>3</sup> CEA Saclay, Gif Sur Yvette

<sup>4</sup> Laboratoire inter-universitaire des systèmes atmosphériques, Créteil

<sup>5</sup> IFSTTAR, Nantes

Les processus d'altération des verres interviennent dans des domaines d'intérêt (i) géologique (compréhension des grands cycles géochimiques tels que CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>), (ii) environnemental (stockage des déchets nucléaires de très haute activité), (iii) patrimonial (conservation et restauration des vitraux), (iv) médical (implants), et (v) alimentaire. La majorité des études sur l'altération du verre concernent des mesures de vitesse d'altération (à court et long terme), des mesures de composition chimique des lixiviats et des études de phases d'altération. Peu d'études considèrent le système solution + solide dans son ensemble et tentent de relier la structure du verre à son comportement lors d'expériences d'altération. Par ailleurs, peu d'études se sont intéressées à l'influence des microorganismes sur l'altération des verres bien que leur influence ait été mise en évidence dans plusieurs cas (basaltes, vitraux...).

Dans ce travail, nous avons choisi d'étudier la bioaltération de verres de composition simplifiée Na<sub>2</sub>O-(0,9Mg-0,1Fe)O-2SiO<sub>2</sub> dont la structure a été caractérisée dans des études antérieures (Trcera et al., 2011a ; Trcera et al., 2011b). Les expériences d'altération ont été menées en solution abiotique (eau ultra pure et milieu de culture) et biotique en présence de la souche *Pseudomonas Aeruginosa* et à des temps allant de 15 min à 1 mois afin de suivre les premières étapes de l'altération. La composition des lixiviats a été suivie avec un spectromètre ICP-OES Perkin Elmer Optima 8300. Les modifications de surface des échantillons ont été étudiées par des expériences de rétrodiffusion Rutherford réalisées sur la microsonde nucléaire du LEEL, CEA Saclay (faisceau a d'énergie 2,9 MeV).

Bien que la chimie de l'eau ne soit pas modifiée sur des temps courts, l'étude des modifications de surface met en évidence des différences de mécanismes aux premiers stades de l'altération entre conditions abiotiques et conditions biotiques.

N. Trcera, M. Tarrida, S. Rossano (2011a) *Journal of Raman Spectroscopy* 42, 765-772

N. Trcera, S. Rossano, K. Madjer, D. Cabaret (2011b) *Journal of Physics - Condensed Matter*, 23, 255401-255409

### 10.1.16 (p) Installation d'une plate-forme d'imagerie à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour

Pascale Sénéchal<sup>1</sup>, Fabrice Guerton<sup>1</sup>, Peter Moonen<sup>1</sup>, Patrice Creux<sup>1</sup>, Gilles Pijaudier-Cabot<sup>2</sup>, Alain Graciaa<sup>1</sup>, Richard Rivenq<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau<sup>2</sup>LFC-R, Anglet<sup>3</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

Une plate-forme Imagerie est en cours d'installation sur le site de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour. Elle comprend deux tomographes à rayons X permettant des acquisitions en micro et nano tomographie. Cette plate-forme sera également équipée de périphériques permettant d'effectuer des acquisitions in situ (dans des cellules d'essai) sous pression et sous température avec circulation de fluides, ainsi que d'équipements informatiques pour le traitement et l'analyse des images obtenues (post-traitement, segmentation, quantification, etc.).

Ces équipements permettront d'obtenir des images présentant une résolution comprise entre quelques dizaines de microns et environ 0,7 microns et ce dans des conditions statiques ou dynamiques (si les contraintes liées à l'échantillon l'autorisent). Outre les applications de caractérisation de géomatériaux, ces équipements ont pour objet de fournir des données expérimentales permettant en particulier de faire progresser la compréhension des écoulements complexes en milieux poreux, la caractérisation des microstructures et de leur évolution liées aux divers processus de vieillissement.

Nous ferons ici une présentation de cette nouvelle plate-forme.

## 10.2 La place des "Très Grandes Infrastructures de Recherche" dans le paysage des géosciences françaises

### (The role of "Very Large Research Infrastructure" in the French Geosciences)

#### Responsables :

- Georges Ceuleneer (GET, Toulouse)  
georges.ceuleneer@get.obs-mip.fr
- Jean-François Stephan (INSU, Paris)  
jean-francois.stephan@cnrs-dir.fr

#### Résumé :

Les Très Grandes Infrastructures de Recherche (TGIR) du CNRS jouent un rôle fédérateur pour la communauté des Géosciences, à la fois au plan national et international. Des avancées scientifiques majeures eussent été impossibles sans leur déploiement. Au cours de cette session, Michel Diament brosera un état des lieux des différents TGIR « Sciences de la Terre » pilotés par l'INSU en mettant l'accent sur la prospective : « Quel avenir pour les TGIR dans le contexte actuel ? ». Les exposés suivants seront destinés à présenter plus en détails les objectifs scientifiques et le mode de fonctionnement des principaux TGIR tout en insistant sur le contexte ayant conduit à leur création et à leur pérennisation. Tony Monfret, Jean Chery et Helle Pedersen nous présenteront le réseau sismologique et géodésique RESIF dont l'objectif est de développer une infrastructure d'observation géophysique intégrée et de distribution de données, afin d'étudier la dynamique de la Terre et de mieux comprendre les aléas associés. Georges Ceuleneer et Gilbert Camoin nous parleront de la participation française et européenne au programme international de forage océanique (IODP) qui aborde un certain nombre de thématiques fondamentales dans des domaines aussi divers que les changements climatiques globaux, la biosphère profonde, la sismotectonique et les risques associés, la composition et la structure de la lithosphère océanique et l'évolution des chaînes de montagnes et les relations orogénèse/climat. Une présentation de l'observatoire multidisciplinaire européen des fonds marins (EMSO) sera également au programme de cette session. Nous nous attacherons ensuite, au travers d'exposés de synthèse à présenter quelques résultats marquants acquis grâce aux TGIR. En particulier, Marianne Conin nous montrera comment les expéditions IODP NanTroSEIZE dans la fosse de Nankai au large du Japon ont permis des avancées décisives dans notre compréhension des zones sismogéniques et tsunamigéniques. Denis-Didier Rousseau présentera des résultats obtenus dans le cadre de l'International Continental Drilling Project et fera l'état des lieux sur les moyens de carottage et sur l'Equipex CLIMCOR. Une large place sera ouverte à la discussion.

### 10.2.1 (o) Les Très Grandes Infrastructures de Recherche dans le paysage français des Géosciences : un panorama

Michel Diament<sup>1</sup>, Jean-François Stephan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INSU-CNRS, Paris

### 10.2.2 (o) EMSO : Les observatoires fond de mer européens, outils essentiels pour la compréhension du système Terre.

Marcia Maia<sup>1</sup>, Mathilde Cannat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IUEM, Plouzané

<sup>2</sup>IPG Paris

### 10.2.3 (o) Le réseau sismologique et géodésique français RESIF : un instrument fédérateur de la communauté française des sciences de la Terre

Tony Monfret<sup>1</sup>, Helle Pedersen<sup>2</sup>, Jean Chéry<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>2</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>3</sup>Géosciences Montpellier

RESIF est un projet qui a démarré en 2008 et qui implique de nombreux acteurs appartenant à des organismes et établissements de recherche français dans le domaine des sciences de la Terre. C'est un projet national fédérateur et dont l'objectif est de développer en France métropolitaine dans un premier temps, une infrastructure d'observation géophysique intégrée et de distribution de données, afin d'étudier la dynamique de la Terre et de mieux comprendre les aléas associés.

RESIF fonctionne sous la forme d'un consortium incluant de nombreux partenaires et a passé des accords avec deux actions transverses et huit actions spécifiques dans le domaine de la sismologie, de la géodésie et de la gravimétrie. Chaque action spécifique est autonome et a son propre système de gouvernance, sa propre politique de partenariat, de financement, et collabore avec les actions transverses dans un cadre d'archivage et de distribution/d'accès libre et gratuite de leurs données ainsi que de la valorisation auprès du public et des collectivités territoriales, des résultats scientifiques obtenus.

Une partie importante du budget de RESIF est assuré par ses partenaires, via leurs financements propres. Cette fédération des efforts a favorisé l'obtention de financements SOERE et le soutien du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie. En 2012, RESIF a été lauréat d'un projet EquipEx qui lui permet de financer pendant sept ans l'achat et l'installation d'instruments scientifiques sur tout le territoire national.

RESIF est également une des contributions françaises majeures à EPOS (European Plate Observing System) qui a comme vocation de construire un outil de recherche européen pour l'observation et la compréhension de la Terre.

### 10.2.4 (o) La participation française aux forages scientifiques continentaux : ICDP et CLIMCOR

Michel Calzas<sup>1</sup>, Denis-Didier Rousseau<sup>2</sup>

<sup>1</sup>DT INSU, Plouzané

<sup>2</sup>CERES-ERTI & LMD, Paris

### 10.2.5 (o) La France et l'Europe : actrices majeures du programme de forages scientifiques dans les océans (IODP)

Georges Ceuleneer<sup>1</sup>, Gilbert Camoin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

### 10.2.6 (o) Les risques sismiques et tsunamigéniques et les succès des expéditions IODP (JFAST, Nantroseize et CRISP)

Marianne Conin<sup>1</sup>, Pierre Henry<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GeoRessources, Nancy

<sup>2</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

## 10.3 Géosciences en régions polaires et sub-polaires

### Geosciences in polar and sub-polar regions

#### Responsables :

- Jérôme Bascou (Université de Saint-Etienne)  
jerome.bascou@univ-st-etienne.fr
- Loïc Labrousse (iSTeP, Paris)  
loic.labrousse@upmc.fr
- Bertrand Moine (Université de Saint-Etienne)  
bertrand.moine@univ-st-etienne.fr

#### Résumé :

Stimulés par l'année polaire internationale (2007-2009) de nombreux programmes se sont mis en places afin de répondre aux enjeux cruciaux des régions polaires. Ces zones dont les structures géologiques superficielles et profondes restent encore mal connues car difficiles d'accès sont de terrains privilégiés pour des études pluridisciplinaires qui souvent combinent des observations de terrains, des analyses pétrologiques et géochimiques, des données géophysiques (notamment sismologiques et magnétiques) et satellitaires avec des observations géodésiques, glaciologiques et océanographiques. Cette session pourra donc être le lieu d'information sur les derniers travaux issues de différentes équipes dans un large cadre scientifique.

Une session axée sur la géologie des régions polaires avait déjà été organisée avec succès par René Pierre Ménot et Frédérique Rémy lors de la RST de Nancy en 2008. Depuis, avec la fin de l'année internationale polaires en 2009 de nombreux travaux ont été publiés par des équipes incluant des chercheurs français et associées à de grands programmes soutenues par l'institut polaire (IPEV), l'INSU et l'ANR. Cette session permettrait également d'établir des échanges et d'amorcer une concertation pour la poursuite et la mise en place de nouveaux programmes dans un cadre pluridisciplinaire, à l'instar du grand chantier arctique qui vient d'être lancé par le CNRS. En 2014 nous pourrions bénéficier pour l'Antarctique des nouvelles données des stations sismologiques installées en Terre Adélie ainsi que des retours de missions de terrain menées dans le cadre du programme IPEV-ARLITA (Architecture de la Lithosphère de Terre Adélie). Différents programmes ont été soutenus précédemment ou sont actuellement soutenus par l'Institut Polaire Français (IPEV) dans des domaines variés des Sciences de la Terre (paléoclimatologie, glaciologie, météorites).

#### Mots-clés :

Architecture crustale et lithosphérique, exploration géophysique, évolution géologique et géodynamique, volcanologie, glaciologie, paléoclimatologie.

### 10.3.1 (o) Talisker 1077 IPEV, Chemical transfers across the lithosphere of Kerguelen : from the mantle to the ocean

Damien Guillaume<sup>1</sup>, Marc Le Romancer<sup>2</sup>, Pieter Van Beek<sup>3</sup>, Adélie Delacour<sup>4</sup>, Guillaume Delpech<sup>5</sup>, Valérie Chavagnac<sup>1</sup>, Catherine Jeandel<sup>3</sup>, Damien Cardinal<sup>6</sup>, Jean Yves Cottin<sup>4</sup>, Michel Grégoire<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

<sup>2</sup>Laboratoire de microbiologie des environnements extrêmophiles, Plouzané

<sup>3</sup>LEGOS, Toulouse

<sup>4</sup>LMV, Saint-Etienne

<sup>5</sup>GEOPS, Orsay

<sup>6</sup>LOCEAN, Paris

Dans le cadre très particulier et unique au monde du contexte géologique de Kerguelen, embryon de croûte continentale au milieu de l'Océan Indien, Talisker s'intéresse aux transferts de fluides (aqueux ou magmatiques) affectant la lithosphère de Kerguelen à différents niveaux structuraux, depuis le manteau supérieur jusqu'à la surface ainsi qu'à la migration et la dissémination des éléments dans l'Océan Austral. Trois aspects principaux sont suivis : la caractérisation des paléofluides ayant circulés dans les roches du manteau ou associés aux mises en place de roches plutoniques ; la caractérisation des systèmes hydrothermaux actifs et des interactions roches-fluides-biosphère ; la quantification des flux d'éléments chimiques depuis le continent vers l'océan cotier.

Talisker est un programme de recherche pluridisciplinaire supporté financièrement pour la réalisation des campagnes de terrain par l'institut polaire IPEV. Il regroupe des géologues, des microbiologistes et des océanographes.

### 10.3.2 (o) Sensibilité de la sédimentation du fjord de la Table à la dynamique de la calotte glaciaire Cook durant le Petit Age Glaciaire (Archipel des Kerguelen, Océan Indien, 49°S)

Emmanuel Chapron<sup>1,2</sup>, Elisabeth Michel<sup>3</sup>, Patrick Albéric<sup>2</sup>, Xavier Crosta<sup>4</sup>, Léo Chassiot<sup>2</sup>, Nicolas Caillon<sup>5</sup>, Vincent Jomelli<sup>6</sup>

<sup>1</sup>GEODE, Toulouse

<sup>2</sup>ISTO, Orléans

<sup>3</sup>LSCE, Gif-sur-Yvette

<sup>4</sup>EPOC, Arcachon

<sup>5</sup>LGGE, Grenoble

<sup>6</sup>LGP, Meudon

Ce travail présente la séquence glacio-marine du fjord de la Table drainant le glacier Ampère (un cinquième de la Calotte Glaciaire Cook) sur Kerguelen, dont le retrait significatif a développé des lacs proglaciaires et exposé des tourbes d'âge Holocène. Ces lacs sont barrés par plusieurs cordons morainiques associés aux fluctuations glaciaires durant le Petit Age Glaciaire (PAG). Durant la campagne océanographique MD172-VT104 KAVIAR/TABLE, trois stations de carottages ont été sélectionnées dans le fjord sur la base d'une cartographie acoustique détaillée. L'ensemble de ces carottes composées de boues bioturbées localement interrompues par des dépôts de crues catastrophiques et quelques niveaux de tephra, a été finement daté par radiocarbone et mesuré sur un banc GEOTEK selon une résolution pluriannuelle. Plusieurs périodes détritiques dans le fjord au cours des derniers 5000 ans associées à des pics de susceptibilité magnétique et de gamma densité témoignent de phases d'avancées glaciaires contemporaines des moraines du PAG dans la plaine d'Ampère et de moraines Holocène identifiées en Nouvelle Zélande ou en Patagonie. Il apparaît ainsi que le PAG ce traduit par une

avancée maximale des glaciers à Kerguelen, mais que ceux-ci ont été probablement réduit durant une large partie de l'Holocène.

### 10.3.3 (o) Les roches crustales profondes de l'Archipel de Kerguelen (Sud de l'Océan Indien)

June Chevet<sup>1</sup>, Michel Grégoire<sup>2</sup>, S.Y. O'Reilly<sup>3</sup>, Marie-Christine Gerbe<sup>1</sup>, Guillaume Delpech<sup>4</sup>, Bertrand Moine<sup>1</sup>, Damien Guillaume<sup>2</sup>, William Griffin<sup>3</sup>, Jean Yves Cottin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LMV, Saint-Etienne

<sup>2</sup>GET, Toulouse

<sup>3</sup>GEMOC, Macquarie University, Northridge Sydney, Australie

<sup>4</sup>IDES, Orsay

L'Archipel de Kerguelen, partie émergée du plateau Nord océanique de Kerguelen résulte de l'activité du point chaud débutant vers - 30 Ma dans un contexte purement océanique alors que la partie Sud du plateau a été édifié sur une zone de transition Océan-Continent. Lors de ce stade précoce de l'histoire de l'Archipel, le point chaud de Kerguelen se situe à proximité de la Ride Sud Est Indienne impliquant un mélange de sources mantelliques entre un composant enrichi (EM1-EM2) et un composant de type MORB. La ride s'est ensuite déplacée vers le Nord-Est laissant le plateau dans sa position intraplaque actuelle. Le magmatisme observé sur l'Archipel de Kerguelen évolue depuis une signature tholeiitique-transitionnel, lors de l'interaction entre la ride et le point chaud, vers une signature alcaline à fortement alcaline lorsque le point chaud reste seul acteur du magmatisme. L'Archipel de Kerguelen se caractérise également par un fort épaissement crustal résultant d'un sous-plaquage magmatique. Cette croûte épaissie abrite de nombreuses poches magmatiques reliées entre elles par des dykes. Cette étude apporte des données complémentaires sur les roches cumulatives crustales profondes remontées par les basaltes alcalins néogènes et complète notre connaissance sur la tuyauterie volcano-plutonique des parties profondes de la croûte épaissie de Kerguelen depuis le manteau jusqu'aux coulées basaltiques de surface. Les données microstructurales et géochimiques (majeur et traces) montrent que des cumulats mafiques et ultramafiques tholeiitiques-transitionnels cristallisent dans les parties profondes de la croûte. Certains de ces cumulats crustaux profonds d'affinité tholéitique-transitionnelle ont enregistré des interactions avec des magmas alcalins dues à la percolation de magmas alcalins plus jeunes. De ce fait, ces cumulats ont pu participer aux signatures géochimiques et isotopiques caractéristiques des laves récentes de Kerguelen.

### 10.3.4 (o) Structures crustale et lithosphérique de la zone de cisaillement du Mertz, limite Est du craton de Terre Adélie (Antarctique de l'Est). Etude des fonctions récepteurs et des ondes SKS

Gaëlle Lamarque<sup>1</sup>, Guilhem Barruol<sup>2</sup>, Fabrice Fontaine<sup>2</sup>, Jérôme Bascou<sup>1</sup>, René-Pierre Ménot<sup>1</sup>, Jean-Yves Cottin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LMV, Saint-Etienne

<sup>2</sup>Laboratoire GéoSciences Réunion, Université de la Réunion, Saint-Denis

Le craton Néoarchéen-Paléoproterozoïque de Terre Adélie (Terre Adélie craton : TAC, 135-146°E) est limité à l'Est par la zone de cisaillement du Mertz (Mertz shear zone : MSZ, 1.5-1.7Ga), qui le sépare du domaine Paléozoïque. Elle peut être corrélée à la zone de cisaillement de Kalinjala ou de Coorong au sud de l'Australie, qui séparent le craton de Gawler du domaine Paléozoïque.

Une étude sismologique a été menée via le programme IPEV-ArLiTA

pour caractériser la structure de la croûte, l'extension latérale des différentes unités tectoniques autour de la MSZ et la déformation du manteau lithosphérique. Couplés à la station permanente DRV (Geoscope), 4 sismomètres ont été déployés pendant 2 ans de part et d'autre et au-dessus la MSZ. L'analyse des fonctions récepteurs, permettant d'estimer l'épaisseur de croûte, a été associée à l'étude des ondes SKS pour contraindre l'anisotropie sous les stations.

Les fonctions récepteurs suggèrent que la croûte cratonique est épaisse (40 à 44km) et qu'elle s'amincit (36km) à l'aplomb de la MSZ. La croûte est plus fine (26km) dans le domaine Paléozoïque. La MSZ constitue donc une structure majeure entre le craton épais et une croûte continentale plus mince. L'épaisseur crustale du TAC est proche de celle du Gawler (>40km) alors que celle du domaine Paléozoïque australien ont été estimées à 31 et 35km. La transition entre le craton et le domaine Paléozoïque semble donc plus marquée en Antarctique qu'en Australie. L'étude des ondes SKS au sein du TAC suggère une direction de polarisation des ondes rapides parallèles à la marge continentale ( $\Phi=95$  à  $119^\circ\text{E}$ ) et des déphasages variant de 0.75 à 1.29s. Malgré le faible nombre d'observations, la station installée sur la lithosphère Paléozoïque semble indiquer une signature différente ( $\Phi=N59.03^\circ\text{E}$  et  $\delta t=0.61\text{s}$ ). La station à la MSZ ne montre pas de signature particulière qui prouverait l'enracinement de la MSZ dans le manteau.

Ces résultats suggèrent que la croûte a gardé en mémoire la signature de la bordure du craton, de par son changement d'épaisseur à la limite du craton. La déformation visible dans le manteau ne montre, par contre, aucune corrélation évidente avec les structures paléoproterozoïques mais plutôt avec la structuration de la marge, ce qui indiquerait que la majeure partie de la déformation visible sous la Terre Adélie est probablement liée au récent rifting Australie - Antarctique et à l'ouverture de l'océan Austral.

### 10.3.5 (o) Apports des données organiques et argileuses du paléogène des îles de nouvelle Sibérie pour la reconstitution des paléoenvironnements et paléoclimats de l'arctique sibérien

Johann Schnyder<sup>1</sup>, Guillaume Suan<sup>2</sup>, Speranta - Maria Popescu<sup>3</sup>, Daichi Yoon<sup>1,4</sup>, Jean-Pierre Suc<sup>1</sup>, François Baudin<sup>1</sup>, Loïc Labrousse<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>LGTPE, Lyon

<sup>3</sup>GeoBioStratData.Consulting, Rillieux la Pape

<sup>4</sup>IFP School (IFP), Rueil - Malmaison

Le début du Paléogène est ponctué d'épisodes de changements climatiques majeurs et abrupts qui sont bien documentés aux basses latitudes. La plupart des données sur ces changements provenant de sites de basses et moyennes latitudes, la connaissance des paléoenvironnements et des paléoclimats de cet intervalle est très fragmentaire en Arctique. Dans ce contexte, l'expédition « NSI 2011 » menée dans les Îles de Nouvelle Sibérie a ouvert la voie à l'étude des séries d'âge Paléogène des îles de Belkovsky et de Faddeevsky. Ces séries sont caractérisées par une sédimentation argilo-silteuse exposant de nombreux lits de charbon riches en ambre.

La caractérisation du contenu organique (pyrolyse Rock-Eval,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ , palynofaciès et analyse pollinique) de deux coupes a permis de montrer qu'elles possèdent un contenu organique continental (Type III) très bien préservé et immature ( $T_{\text{max}} < 435^\circ\text{C}$ ) avec une production de matière organique de plantes en C3 et d'algues lacustres importante dans les lits charbonneux. La minéralogie des sédiments, étudiée par DRX sur roche totale et sur les minéraux argileux (fraction inférieure à  $2\ \mu\text{m}$ ), montre dans les deux coupes des proportions élevées de quartz et d'illite dans

les cortèges argileux. Les niveaux charbonneux coïncident avec l'augmentation de la proportion de kaolinite (jusque 60%), suggérant des périodes climatiques chaudes et humides.

Ces environnements correspondaient donc à des zones de marécage-tourbière proches de reliefs élevés fournissant le matériel détritique (Chaîne de Verkhoïansk) et soumis à l'influence de l'évolution du système deltaïque de la paléo-Lena en zone arctique au Paléogène. L'analyse du contenu pollinique conduit à envisager un enregistrement sédimentaire relevant (1) du maximum thermique de l'Eocène pour la série de Faddeevsky, avec notamment la présence d'une mangrove appauvrie, d'une des phases de détérioration climatique qui suivent pour la série de Belkovsky.

### 10.3.6 (o) Rare earth and trace elements of fossil bioapatite as palaeoenvironmental proxies : the Lower Devonian of the Andrée Land, Svalbard

Žigaitė<sup>1</sup>, Alexandre Fadel<sup>2</sup>, Alberto Pérez-Huerta<sup>3</sup>, Teresa Jeffries<sup>5</sup>, Per Ahlberg<sup>5</sup>, Henning Blom<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Subdepartment of Evolution and Development, Uppsala University  
 Norbyvägen, Uppsala, Suède

<sup>2</sup> Géosystèmes, Lille

<sup>3</sup> Department of Geological Sciences, University of Alabama,  
 États-Unis

<sup>4</sup> Imaging and Analysis Center, Science Facilities Department, Natural  
 History Museum, London, Royaume-Uni

<sup>5</sup> Subdepartment of Evolution and Development, Department of  
 Organismal Biology, Uppsala University, Suède

The Devonian sediments of Spitsbergen represent deposition in a continental rift basin along the northern margin of the Old Red Sandstone (ORS) landmass. This succession is essentially confined to a major graben with unique depositional history and its shift from coarse clastic red-beds, mainly of alluvial fan and fluvial origin, to a succession of more greyish fluvial and possible deltaic sediments suggest the transition from the southern arid zone to the equatorial tropics. However, the detailed palaeoenvironmental conditions and the nature of the basin are yet poorly understood (Blomeier et al., 2003; Žigaitė et al., 2013), although it plays an important role as a regional niche and separate biogeographical province of freshwater vertebrates in Early Devonian. Rare earth and trace element compositions have been studied in a range of early vertebrate micromeric dermoskeletal remains from the Lower Devonian sections of the Andrée Land Group succession, Wood Bay and Grey H?k formations. The results suggest that the REE patterns in fossil bioapatite, particularly the robust biomineral of enameloid tissue, do maintain the record of taphonomic conditions and early diagenetic history. The Europium (Eu) and Cerium (Ce) anomalies suggested taphonomic and palaeoenvironmental regimes, shale normalized compilations of Lanthanum (La) and Ytterbium (Yb), and La and Samarium (Sm) ratios proved to be indicative of terrestrial freshwater influence, in contrast to bell-shaped REE patterns referring to marine environment. Blomeier D., Wisshak M., Dallmann W., Volohonsky E. and Freiwald A. (2003) Facies analysis of the Old Red Sandstone of Spitsbergen (Wood Bay Formation) : Reconstruction of the depositional environments and implications of basin development. FACIES 49, 151-174.

Žigaitė Ž., Karatajūtė-Talimaa V., Goujet D. and Blom H. (2013) Thelodont scales from the Lower and Middle Devonian Andrée Land Group, Spitsbergen. GFF 135, 57-73.

### 10.3.7 (o) La mangrove en domaine arctique au maximum thermique de l'Eocène

Speranta - Maria Popescu<sup>1</sup>, Jean-Pierre Suc<sup>2</sup>, Daichi Yoon<sup>2,3</sup>, Guillaume Suan<sup>4</sup>, Johann Schnyder<sup>2</sup>, François Baudin<sup>2</sup>, Loïc Labrousse<sup>2</sup>, Marie Salpin<sup>2</sup>, Jean-Luc Auxière<sup>5</sup>

<sup>1</sup>GeoBioStratData.Consulting, Rillieux la Pape

<sup>2</sup>ISTeP, Paris

<sup>3</sup>IFP School, Rueil-Malmaison

<sup>4</sup>LGTPE, Lyon

<sup>5</sup>TOTAL, Paris-La Défense

Quarante échantillons des coupes Faddeevsky et Belkovsky (Iles de Nouvelle Sibérie) ont été analysés pour leur contenu pollinique.

Cette flore, diversifiée (122 taxa pour Faddeevsky et 75 taxa pour Belkovsky), inclut des éléments arborés mégathermes (*Altingia*, *Buxus* type bahamensis, *Citrus*, *Passifloraceae*, *Rubiaceae*, *Fabaceae* *Mimosoideae*), méga-mésothermes (*Cathaya*, *Engelhardia*, *Distylium*, *Fothergilla*, *Hamamelis*, *Microtropis*, *Nyssa*, *Symplocos*, *Arecaceae*, type *Taxodium*, *Sapotaceae*, etc.), mésothermes (*Acer*, *Alnus*, *Betula*, *Eucommia*, etc.), méso-microthermes (*Cedrus*, *Tsuga*), microthermes (*Abies*, *Picea*). Les plantes herbacées sont surtout représentées par des plantes hygrophiles (*Alisma*, *Epilobium*, *Menyanthes*, *Potamogeton*, etc.) à côté de taxons ubiquistes (*Apiaceae*, *Euphorbia*, *Hypericum*, *Morina*, *Mercurialis*, etc). Les halophytes (arbustes : *Ephedra*, *Tamarix* ; herbes : *Amaranthaceae*-*Chenopodiaceae*, *Caryophyllaceae*, *Plumbaginaceae*, *Nitraria*, etc.) sont également présentes.

La présence de la mangrove à *Avicennia* dans la coupe de Faddeevsky est une découverte importante.

Les milieux de dépôt étaient palustres, proches du paléolittoral, avec des apports fluviaux prononcés. Plusieurs ensembles de végétation ont pu être mis en évidence, allant des associations directement liées au littoral (mangrove à *Avicennia*, halophytes), avec des plans d'eau douce en arrière (plantes aquatiques, ripisilve), à une forêt subtropicale sempervirente (à éléments tropicaux), puis une forêt mésophile décidue relayée en altitude par les conifères (tempérés-froids et boréaux).

Des variations marquées de la végétation reflètent les fluctuations du climat en relation avec les changements de température essentiellement. Il est possible de situer la coupe de Faddeevsky à l'Eocène inférieur (maximum thermique) et celle de Belkovsky au début du refroidissement de l'Eocène moyen.

Ces travaux ont été effectués dans le cadre du projet GRI Arctique.

### 10.3.8 (p) Le Craton de Terre Adélie, une fenêtre sur la dynamique de la lithosphère néoarchéenne - paléoprotérozoïque. Apports et perspectives du programme ArLiTA

Jérôme Bascou<sup>1</sup>, René-Pierre Ménot<sup>1</sup>, Gaëlle Lamarque<sup>1</sup>, Guilhem Barruol<sup>2</sup>, Yann Rolland<sup>3</sup>, Bernard Henry<sup>4</sup>, Jean-Yves Cottin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LMV, Saint-Etienne

<sup>2</sup>Université de la Réunion, IPG Paris, Géosciences Réunion, Saint Denis

<sup>3</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>4</sup>IPG Paris

La côte de la Terre Adélie (Est Antarctique) met à l'affleurement des fragments crustaux d'âge néoarchéen (2.5 Ga) et paléoprotérozoïque (1.7 Ga) qui constituent un ensemble unique au sein du continent Est-Antarctique. Le Craton de Terre Adélie (TAC) se distingue ainsi par l'importance de l'événement paléoprotérozoïque (1.7 Ga) et l'absence de réactivation grenvillienne (1 Ga) et panafricaine (Ross, 0.5 Ga), Ménot et al. 2007. Les différents blocs du TAC sont marqués par une tectonique en transpression qui se matérialise par des zones à structures

horizontales (structures en dômes) au contact de larges couloirs de cisaillement verticaux. Certaines de ces structures sont d'échelle plurikilométrique et trouvent leur continuité au niveau du craton du Gawler au sud de l'Australie. Les structures et la déformation de la Terre Adélie sont étudiées depuis 2009 dans le cadre du programme ArLiTA (Architecture de la Lithosphère de Terre Adélie). La démarche adoptée est pluridisciplinaire et combine différentes méthodes d'analyse et d'interprétation, connectant les observations de terrain aux modèles géodynamiques. La caractérisation des structures est également multi-échelles depuis l'étude des structures cristallines observées au microscope électronique à l'imagerie des structures lithosphériques à partir d'enregistrements sismologiques. Les travaux menés dans le cadre de ce programme permettent ainsi de définir une première image 3D des grandes structures du TAC et de préciser les modalités de la déformation de la croûte continentale à la transition Archéen - Paléoprotérozoïque, période charnière de l'histoire de la Terre.

### 10.3.9 (p) Structure et cinématique d'une chaîne péri-arctique : apports des données thermométriques RSCM, thermochronologiques basse-température dans les Brooks Range et la Mer de Beaufort

Maelianna Bigot-Buschendorf<sup>1</sup>, Charlotte Fillon<sup>2</sup>, Frédéric Mouthereau<sup>1</sup>, Loïc Labrousse<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>Institute of Earth Sciences Jaume Almera, Barcelona, Espagne

Les Brooks Range au Nord de l'Alaska et leur équivalent canadien, les British Mountains, résultent de la collision entre la marge continentale Arctique et un arc volcanique associé à différentes unités continentales accretées. Le calendrier des événements de collision suggère une succession d'événements depuis 110 Ma. La séquence et l'importance de ces événements, notamment au Tertiaire restent cependant mal contraintes. La déformation a-t-elle été ponctuelle ou au contraire continue ? Quels sont les facteurs de contrôle de la déformation ; tectonique ou climatique ? En quoi la dynamique de cette chaîne a-t-elle été affectée par les conditions climatiques du domaine arctique ? Pour répondre à ces questions nous avons étudié la séquence de déformation le long d'un transect traversant les Brooks Range du sud vers le nord jusqu'à la mer de Beaufort.

Pour reconstruire l'évolution temps-température de l'ensemble du transect différents outils incluant la thermométrie RSCM sur matériel carbonaté, la thermochronologie basse-température (traces de fission sur apatite, datation (U-Th)/He) ont été associés à l'étude de lignes sismiques offshore acquises en Mer de Beaufort et dans le delta de MacKenzie.

Un modèle thermo-cinématique 3D (Pecube) a été utilisé pour déterminer la cinématique (vitesse et durée) des zones de failles majeures. Le modèle reproduit en outre de nouveaux âges obtenus par analyses (U-Th)/He sur apatites et zircons et traces de fissions sur apatites combinées aux données thermométriques RSCM. De plus, des lignes sismiques à terre et en mer ont été étudiées afin de contraindre la propagation de la déformation dans les zones externes.

Toutes ces données ont été combinées pour discuter de la prévalence des conditions aux limites imposées par le système de subductions péri-Pacifique, et des spécificités du régime d'érosion en climat polaire sur la construction des reliefs à ces hautes latitudes.

### 10.3.10 (p) Structure thermique, évolution tectonique et géodynamique des zones internes des Brooks et de la Péninsule de Seward, en Alaska

Nicolas Lemonnier<sup>1</sup>, Loïc Labrousse<sup>1</sup>, Philippe Agard<sup>1</sup>, Alison Tills<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>U.S Geological Survey, Anchorage, Alaska, États-Unis

Les zones internes des chaînes de montagne exposent les roches métamorphiques enregistrant l'évolution thermique des parties profondes des orogènes, de l'enfouissement à l'exhumation définitive. Elles fournissent des contraintes pour les reconstitutions paléogéographiques et tectoniques des zones de convergence.

Dans l'Arctique, le bassin Amerasien ouvert durant le Crétacé s'est développé dans la plaque supérieure du système de subduction péri-Pacifique. L'évolution tectonique de la chaîne des Brooks, dans le nord de l'Alaska, est une clé pour la compréhension des couplages possibles entre dynamiques arctique et pacifique. Les roches métamorphiques de HP-BT, maintenant exposées dans la "Schist Belt" au sein des Brooks Ranges, et dans le complexe de Nome (péninsule de Seward), ont été exhumées au Crétacé supérieur. Les processus responsables de leur exhumation (soit un empilement de nappe syn-collisionnel soit un détachement lié à une extension post-orogénique), sont encore en débat. La thermométrie systématique par spectrométrie Raman sur la matière organique (RSCM) le long de transects régionaux dans les Brooks Ranges et la péninsule de Seward, ainsi que la modélisation des conditions de stabilité des paragenèses observées, permettent l'identification d'unités ayant des contrastes d'évolution thermique et d'histoires pression-température au sein des deux régions.

Au sein des Brooks Ranges, l'évolution thermique de la chaîne montre une augmentation de la température du sud vers le nord au sein de l'unité de la "Phyllite et Metagrawyacke belt" et une température constante et d'environ 518°C (± 20°C) au sein de l'unité "Schist belt". Cette température n'a pas de différence significative avec la température maximale mesurée au sein du complexe de Nome dans la péninsule de Seward (526°C±25°C). Ces températures maximales ont été atteintes lors des stades précoces de l'orogénèse Brookienne, aucun impact des événements de haute température tardifs (Kigluaik Mountains) n'est décelable dans nos données.

### 10.3.11 (p) Enregistrement des changements climatiques aux hautes latitudes au Paléogène et au Jurassique inférieur en Arctique

Marie Salpin<sup>1</sup>, Johann Schnyder<sup>1</sup>, François Baudin<sup>1</sup>, Guillaume Suan<sup>2</sup>, Loïc Labrousse<sup>1</sup>, Speranta-Maria Popescu<sup>3</sup>, Jean-Pierre Suc<sup>1</sup>, Jean-Luc Auxière<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>LGLTPE, Lyon

<sup>3</sup>GEOBIOSTRATDATA. CONSULTING, Rillieux la Pape

<sup>4</sup>TOTAL, Paris-La Défense

L'océan Arctique moderne occupe environ 2.6% de la surface de l'océan global actuel et 1% de son volume. Sa dynamique est caractérisée aujourd'hui par un système de gyres internes et de passages étroits l'isolant en partie de la circulation océanique globale. Sa réaction aux changements climatiques globaux est d'autant plus difficile à comprendre qu'il a sa dynamique propre gouvernée par des processus physico-chimiques spécifiques du climat boréal. L'alimentation du bassin est en effet dominée par des apports d'eau douce des grands fleuves drainants les cratons (McKenzie, Yenisei, Lena entre autres) et apportant

des quantités importantes de matière organique faiblement dégradée du fait du régime thermique régional. L'océan Arctique a eu une influence sur le paléoclimat global cénozoïque du fait de sa position polaire. L'étude haute résolution des enregistrements de réchauffements rapides associés aux optima climatiques du Paléogène (PETM, ETM2, événements Azolla) et du Jurassique inférieur (comme l'OAE du Toarcien) des marges sibériennes et laurentiennes doit révéler les spécificités de la réponse du bassin arctique aux stimuli globaux et les possibles mécanismes de couplage/découplage de sa dynamique de celle de l'océan global et des surfaces continentales périphériques. Dans le cadre du GRI n° Zones Péri-Arctiques z et d'études antérieures, une collection inédite de séries sédimentaires des intervalles paléogène et jurassique inférieur a été rassemblée des deux côtés du bassin arctique, dans le nord Yukon et dans les îles de Nouvelle Sibérie. Ces deux exemples constituent des cas d'école, en domaine continental (Paléogène) et marin (Jurassique inférieur) pour des études de la réponse du système arctique aux événements globaux. Cette étude vise à la valorisation des données par une étude multi-marqueurs (minéralogie sur roche totale et fraction argileuse, pyrolyse Rock-Eval, palynofaciès, géochimie organique, isotopes du carbone sur matière organique et sur carbonates) des transects échantillonnés et la déconvolution de signaux climatiques fins (pluviométrie, cyclicité saisonnières) sur des échantillons d'intérêt (bois momifié, rostrés de bélemnites).

### 10.3.12 (p) Caractérisation et origine d'un manteau ultra-réfractaire en contexte intra-plaque océanique (Archipel des Kerguelen, TAAF)

Benjamin Wasilewski<sup>1</sup>, Bertrand Moine<sup>1</sup>, Guillaume Delpech<sup>2</sup>, Luc-Serge Doucet<sup>3</sup>, June Chevet<sup>1</sup>, Jean Yves Cottin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LMV, Saint-Etienne

<sup>2</sup>IDES, Orsay

<sup>3</sup>Université Libre de Bruxelles

Le plateau océanique de Kerguelen est issu d'un plume mantellique ayant interagi avec la ride Sud-Est indienne. Parmi les basaltes alcalins de l'archipel ont trouvé de nombreux gisements d'enclaves mantelliques profondément transformées par des interactions métasomatiques avec des magmas alcalins ou carbonatitiques. Un gisement exceptionnel du Nord de l'archipel met à l'affleurement des xénolites mantelliques pluri décimétriques. Ces péridotites sont des harzburgites à spinelle à texture poecélitique légèrement serpentinisées et équilibrées à relativement basses températures (760°C à 910°C). La composition chimique des roches totales présente un caractère extrêmement réfractaire : Mg# entre 0,90 et 0,93 et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO < 1 wt%. Les très faibles concentrations en REE des roches totales ( $\sum \text{REE} \leq 3$  ppm) et des minéraux ( $\sum \text{REE} \leq 0,7$  ppm) mettent également en évidence le caractère particulièrement appauvri de ces roches.

Ces harzburgites peuvent être interprétées comme des résidus de fusion pas ou peu affectés par des processus métasomatiques. Les modèles basés sur les éléments majeurs (Herzberg, 2004) mettent en évidence que ces péridotites ont fondu dans un contexte polybarique débutant à haute pression (4GPa) et nous indiquent des taux de fusion d'au moins 35 %. Les rapports (Ho/Lu)<sub>N</sub> des roches totales qui vont jusqu'à 0,2 impliquent également une fusion dans le faciès à grenat. Ces caractéristiques impliquent que ce manteau ne peut être directement lié à l'activité magmatique de Kerguelen, en particulier être le résidu de l'interaction Ride/Point Chaud qui caractérise le plateau. Les caractéristiques pétrographiques et chimiques (faible teneur en FeO ~ 7.5wt% et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≤ 1 wt%) rapproche ce manteau de ce qu'on connaît en contexte cratonique. Ces péridotites sont-elles l'évidence sous l'archipel d'un fragment de lithosphère mantellique continentale, hérité de la dislocation du Gond-

wana et de la formation de l'Océan Indien ?

## 10.4 L'expérimentation de laboratoire et terrain

### Responsables :

- Christophe Voisin (ISTerre, Grenoble)  
christophe.voisin@ujf-grenoble.fr
- Daniel Brito (LFC-R, Pau)  
daniel.brito@univ-pau.fr

### Résumé :

Les processus naturels rencontrés dans les Sciences de la Terre sont soumis à de nombreux facteurs de contrôle, internes ou externes (environnementaux). La compréhension de leur dynamique nécessite d'identifier les paramètres pertinents. L'approche expérimentale, qu'elle soit au laboratoire ou in situ, peut aider à isoler ces paramètres et à comprendre leur mode d'action sur le processus naturel. Cette session vise à dresser le panorama actuel des nouvelles approches expérimentales développées au laboratoire ou in situ. Les processus naturels considérés ici, sans limitation toutefois, couvrent le champ magnétique et ses fluctuations, la physique de la rupture, les glissements de terrain, les couplages sismo-électriques, les couplages hydromécaniques, etc.

### 10.4.1 *Keynote communication* : Radiographier les volcans avec des rayons cosmiques : instrumentation et applications

Dominique Gibert<sup>1,2</sup>, Jacques Marteau<sup>3,4</sup>, Jean De Bremond D'ars<sup>2</sup>,  
 Kevin Jourde<sup>1</sup>, Serge Gardien<sup>3</sup>, Jean-Christophe Ianigro<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IPG Paris

<sup>2</sup>Géosciences Rennes

<sup>3</sup>Institut de Physique Nucléaire de Lyon, Villeurbanne

<sup>4</sup>Université Claude Bernard, IN2P3, Villeurbanne

Les muons d'origine cosmique sont des particules éphémères de haute énergie pouvant traverser plusieurs kilomètres de roche. Le principe de la radiographie par muons consiste à déterminer la densité d'un massif rocheux en mesurant l'atténuation qu'il produit sur le flux de muons. Les principes physiques et les difficultés de cette nouvelle méthode d'imagerie seront décrites ainsi que les télescopes de terrain que nous avons conçus et réalisés. Les performances de la méthodes seront illustrés à l'aide des résultats d'expériences réalisées sur des volcans (Soufrière de Guadeloupe, Etna, Mayon) et en laboratoire souterrain (Mont Terri).

### 10.4.2 (o) Ground penetrating radar imaging along the LSBB tunnel

Guy Sénéchal<sup>1</sup>, Dominique Rousset<sup>1</sup>, Albane Saintenoy<sup>2</sup>, Hermann Zeyen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IPRA, Université de Pau et des Pays de l'Adour, France

<sup>2</sup>GEOPS, Orsay

The Low Noise Interdisciplinary Underground Science and Technology Laboratory (Laboratoire Souterrain à Bas Bruit, LSBB) of Rustrel is a 3.7 km long tunnel buried inside a lower Cretaceous limestone structure. It constitutes an open window on the heart of the massif, but it remains essentially a blind window : excepted in a 250 m long gallery, the ground and the walls are covered by concrete. Considering the small scale of the heterogeneities (stratigraphy, karstic structures, faults) ground penetrating radar constitutes a well adapted tool to image the geological structures around the tunnel.

The overall tunnel as been investigated using 250 MHz and 100 MHz shielded antennas. First acquisition have been performed by moving the antennas on the ground, in order to image the structures located under the tunnel. Recent investigations have demonstrated the possibility to also image the geological structures on both side of the tunnel, moving the antennas on the walls (where the concrete is not reinforced).

We present a preliminary qualitative description of the structural context along the tunnel, description which can be compared to the observations made during the tunneling, 50 years ago. This description let to identify strong variations in term of reflectivity along the tunnel, possibly correlated to structural (karst, faults) or petrophysical variations. Advanced interpretations will be constrained later, using informations obtained from boreholes which are presently drilled and where future GPR-boreholes investigations will be performed.

### 10.4.3 (o) Imagerie des ruptures par élastographie impulsionnelle

Soumaya Latour<sup>1</sup>, Thomas Gallot<sup>2</sup>, Noëlie Bontemps<sup>3</sup>,  
 Christophe Voisin<sup>3</sup>, Stefan Catheline<sup>4,5</sup>, Philippe Roux<sup>3</sup>, Michel Campillo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ecole Normale Supérieure, Paris

<sup>2</sup>Universidad de la República, Uruguay

<sup>3</sup>ISTerre, Grenoble

<sup>4</sup>Université Claude Bernard, Lyon

<sup>5</sup>Inserm (LabTau), Lyon

Le domaine de la rupture en Sciences de la Terre est très vaste, et s'étend encore un peu plus aujourd'hui avec ces nouvelles observations que sont les tremors, les séismes lents, et à l'opposé les ruptures supershears. Très peu est fait au niveau expérimental pour tenter de reproduire ces différents styles de ruptures et de répondre à certaines questions d'importance pour la maîtrise de l'aléa sismique : entre autres, on peut questionner le rôle des conditions de frottement à l'interface sur la sélection du style de la rupture.

Nous avons développé une technique d'imagerie fondée sur la corrélation des tavelures ultrasonores, que l'on nomme élastographie impulsionnelle.

L'élastographie impulsionnelle est une technique héritée de la médecine, relativement proche de l'échographie. Cette technique expérimentale met à profit la grande différence de vitesse de propagation entre les ondes P (1500 m/s) et les ondes S (4-10 m/s) pour des matériaux particuliers que sont les gels de PolyVinylAlcool (PVA). En incluant des particules de cellulose dans la structure du gel qui serviront de rétrodiffuseurs, il devient possible en réalisant la cross corrélation des tavelures ultrasonores de reconstituer le champ de déplacement dans toute section d'intérêt prise à l'intérieur du volume.

Une première application porte sur les processus de frottement à l'interface entre le gel et son support. Nous avons pu reproduire les différentes ruptures, séismes lents associés aux tremors, ruptures supershears associées au cône de Mach (l'onde de choc). En introduisant une petite dose d'hétérogénéité sur l'interface, on peut aussi porter l'attention sur les changements de vitesse de rupture, notamment sur la transition super-shear lors de la rupture d'une barrière.

D'une manière plus générale, les interfaces complexes, qui comprennent des zones susceptibles de glisser facilement, des barrières qui vont résister au glissement et des aspérités qui une fois mobilisées par la rupture vont libérer beaucoup d'énergie, révèlent une très grande complexité du développement de la rupture, tant lors de la nucléation que de la propagation.

### 10.4.4 (o) Fluids & Faults project : a combination of in-situ, laboratory and numerical experiments

Claude Gout<sup>1</sup>, Pierre Henry<sup>2</sup>, Yves Guglielmi<sup>3</sup>, Louis De Barros<sup>3</sup>,  
 Christian David<sup>4</sup>, Alexandre Schubnel<sup>5</sup>, Frederic Donze<sup>6</sup>, Pierre Dick<sup>7</sup>, Mélody Lefevre<sup>2</sup>, Audrey Bonnelye<sup>4</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>2</sup>CEREGE, Aix-en-Provence

<sup>3</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

<sup>4</sup>GEC, Cergy Pontoise

<sup>5</sup>LGE, Paris

<sup>6</sup>Laboratoire 3S-R, Grenoble

<sup>7</sup>IRSN, Fontenay-aux-Roses

The understanding of fault hydro-mechanical behaviour is critical for a number of domains as hydrocarbon exploration and production, natural risk assessment or CO2 sequestration.

Assessment of this fault behaviour has been addressed during the last decades either by interpretation of laboratory experiments on (small) fault material samples, by deep analysis and difficult interpretation of large data acquisition campaigns on the activity of major fault objects (e.g. the San Andreas Fault or Nankai accretionary wedge), and by numerical attempts to model mechanical and hydraulic reactions of the

fault, like slip or dilation tendency, permeability enhancement or reduction.

The challenge of the Fluids & Faults project is to couple on the same geological object - a strike slip fault crossing the Toarcian Shale in the IRSN Tournemire underground laboratory - the 3 tasks of in-situ hydro-mechanical experiment on the fault itself, laboratory mechanical and hydro-mechanical experiments on the host and fault rock samples, and numerical experiments on the hydro-mechanical models built from data and understanding of the first two tasks.

The combination of a new device able to record simultaneously 3D rock deformation and fluid pressure during pulse tests and injection tests (mHPPP) with in-situ mechanical, hydraulic, electrical and seismic sensors deployed in an array of monitoring wells allows finely deciphering the coupled mechanical and hydraulic fault reactivity under known stress conditions. The calibration of physical and mechanical attributes of both the host rock and the fault rocks sampled at the location of the in-situ experiment is performed in laboratory : porosity, electrical conductivity and permeability anisotropy measurements, failure tests in triaxial cells equipped with piezoelectric transducers for measurement of P and S wave velocity and detection and localization of acoustic emissions.

These multi-scale tests drive a close parameterisation of hydro-mechanical DEM and FEM that will reproduce the real scale in-situ experiment and the laboratory experiment for the goal of designing for the fault a relation between permeability, stress and pore pressure that can be implemented in the industrial domain.

#### 10.4.5 (o) Ultrasonic experimental and numerical studies of wave propagation in porous media

Daniel Brito<sup>1</sup>, Stéphane Garambois<sup>2</sup>, Valier Poydenot<sup>1</sup>, Clarisse Bordes<sup>1</sup>, Michel Dietrich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LFC-R, Pau  
<sup>2</sup>ISTerre, Grenoble

Seismic wave propagation has been intensively studied in laboratory experiments. In those kinds of experiments, waveforms are classically recorded with piezoelectric transducers located on the boundaries of a studied sample. We will present new type of dense measurements, using laser vibrometry : a laser vibrometer delivers calibrated measurements of the displacement or the velocity measured along the laser beam. It allows precise measurements on a wide band of frequency (few kHz to a few MHz) with displacement values as small as the tenth of nanometer. We will show dense cartography measurements of displacements on a face of a cube of aluminum and a cube of heterogeneous limestone, which permit to observe the propagation of seismic waves. We will discuss the compressional and shear waves recorded during the experiment, and will particularly compare records with direct numerical simulations of seismic waves in elastic and poroelastic materials. We will particularly focus on the waveform of the first arrival and of its dispersion characteristics. Besides this constitutive approach, we will conclude that laser measurements might be a powerful tool to test velocity and tomography established codes and also full waveform inversion developing codes to possibly detect fractures, heterogeneities and anisotropy in natural rocks.

#### 10.4.6 (o) Non Linear flow and non Fickian transport in fractured limestone

Claudia Cherubini<sup>1</sup>, Nicola Pastore<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Beauvais  
<sup>2</sup>Politecnico di Bari, Bari, Italie

Laboratory hydraulic and tracer tests have been carried out on an artificially created fractured rock sample. The tests regard the analysis of the hydraulic loss and the measurement of breakthrough curves for saline tracer pulse inside a rock sample of parallelepiped shape (0.60×0.40×0.08 m).

The experimental results have shown evidence of a non-Darcy relationship between flow rate and hydraulic loss that is best described by Forchheimer's law. In the flow experiments both inertial and viscous flow terms are not negligible.

The observed experimental breakthrough curves of solute transport have been modeled by the classical onedimensional analytical solution for the advection-dispersion equation (ADE), the single rate mobile-immobile model (MIM) and an Explicit Network Model (ENM) that takes expressly into account the fracture network geometry.

The results show that the ADE is not able to properly fit the first arrival and the tail of the breakthrough curves. Though ENM shows better fitting results than MIM, the latter remains still valid as it proves to describe the observed curves quite well.

The results show that the existence of nonlinear flow influences solute transport dynamics : the distribution of solute according to different pathways is not constant but it is related to the flow rate. Moreover nonlinear flow influences advection, in that it leads to a delay in solute transport respect to the linear flow assumption. Whereas nonlinear flow does not show to be related with dispersion : geometrical dispersion appears to dominate Taylor dispersion. However the interpretation with the ENM model shows a weak transitional regime from geometrical dispersion to Taylor dispersion for high flow rates. Incorporating the description of the flowpaths in the analytical modeling has proved to better fit the curves and to give a more robust interpretation of the solute transport.

#### 10.4.7 (p) La physique des métamatériaux à l'échelle géophysique : une forêt peut-elle se comporter comme une cape d'invisibilité sismique ?

Matthieu Rupin<sup>1</sup>, Arthur Clerjon<sup>2</sup>, Andrea Colombi<sup>1</sup>, Philippe Roux<sup>1</sup>, Philippe Gueguen<sup>1</sup>, Christophe Voisin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISTerre, Grenoble  
<sup>2</sup>ENS Cachan, Cachan

Nous nous sommes intéressés à la propagation d'ondes élastiques dans un système formé par un ensemble de tiges d'aluminium collées sur une plaque mince de même nature. Ces tiges constituent un ensemble de résonateurs quasi-ponctuels dans le plan de propagation des ondes. Il est possible de les arranger de façon périodique ou aléatoire sur une échelle sub-longueur d'onde. Le métamatériau ainsi constitué révèle une grande complexité du champ d'onde en son sein, avec notamment la présence de plusieurs bandes interdites sur de larges plages de fréquences. Cette complexité fait de ce type de métamatériaux des objets tout à fait singuliers à l'échelle mésoscopique.

A plus grande échelle, une forêt constitue un ensemble de résonateurs verticaux quasi ponctuels et arrangés de façon quasi-périodique ou aléatoire. L'analyse spectrale de données sismologiques passives acquises au sein d'une forêt révèle l'existence de bandes interdites entre 20 et 40-50 Hz, les fréquences prédites pour des arbres d'environ 20 mètres de hauteur. La réalisation d'une expérience de terrain impliquant une source sismique et des lignes de géophones pour mesurer le champ en dehors et à l'intérieur de la forêt devrait permettre la mise en évidence ces bandes interdites pour la propagation des ondes de Rayleigh (onde de surface), ce qui serait alors une élégante démonstration de l'existence de systèmes de résonateurs couplés sub-longueur d'onde à l'échelle géophysique.

Les perspectives de ces travaux s'orientent vers un autre ensemble de

résonateurs couplés à plus basse fréquence (de l'ordre du Hz), les bâtiments. Est-il possible de réaliser de véritables ensembles de bâtiments qui interdiraient la propagation d'ondes choisies dans leur sein ? En d'autres termes, peut-on rêver de réaliser une véritable cape d'invisibilité aux ondes sismiques ?

#### 10.4.8 (p) Importance du déplacement cumulé dans la sélection du style de rupture

Dimitri Zigone<sup>1</sup>, Christophe Voisin<sup>2</sup>, François Renard<sup>2</sup>, Jean-Robert Grasso<sup>2</sup>, Eric Larose<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Southern California, Los Angeles, États-Unis  
<sup>2</sup>ISTerre, Grenoble

Les observations géodésiques et sismologiques le long des grandes zones de subduction ont révélé une succession de styles de ruptures depuis la surface vers la profondeur : grandes ruptures rapides dans la zone sismogénique (0-20 km environ) ; séismes lents et tremors non volcaniques dans la zone de transition (20-40 km environ) ; glissement continu au-delà.

Beaucoup d'études théoriques et/ou expérimentales ont porté leurs efforts sur le rôle des fluides, de la température ou de la pression, des changements de phase minérales, etc. pour expliquer cette succession et cette variété de styles de ruptures.

Un paramètre clé a été oublié : le glissement cumulé. En effet, chaque portion de la zone de subduction passe par toutes les profondeurs successivement, accumulant une quantité de glissement conséquente, jusqu'à 100 km ou plus, suivant le plongement de la subduction. Nous avons donc construit une expérience de frottement dans laquelle nous faisons glisser un patin de sel contre du verre, du PMMA ou du sel. L'essentiel est que le patin soit déformable à une échelle de temps compatible avec la durée des expériences (24h). Ces expériences sont menées à température ambiante, humidité ambiante et sous faible pression normale (de l'ordre de quelques N).

Nous sommes à même de reproduire la succession de styles de ruptures observées dans les subductions : grands événements de stick-slip au début de l'expérience (équivalents de séismes) ; oscillations douces de longue durée et de faible amplitude ensuite (équivalentes aux séismes lents) et glissement continu ensuite, à la vitesse imposée par le moteur. Cette succession s'accompagne de la réorganisation de l'interface et le développement d'une striation dans le sens du glissement. L'émission acoustique est elle aussi modifiée lors de l'expérience. Une forte émission très impulsive accompagne les événements de stick slip ; une émission beaucoup plus faible et de plus longue durée (semblable aux tremors) accompagne les oscillations faibles. Enfin lors du glissement continu, aucune activité acoustique n'a pu être décelée. Nous avons montré que les Tremors Like Signals (TLS) sont émis uniquement lors de la phase d'accélération du patin.

#### 10.4.9 (p) Contribution de la méthode du tenseur de phase à l'interprétation des données magnétotelluriques

Abdelghafour Boukar<sup>1</sup>, Mohammed Djeddi<sup>1</sup>, Abderrazak Bouzid<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie  
<sup>2</sup>CRAAG, Alger, Algérie

Avant toute modélisation ou interprétation de données magnétotelluriques, il est primordiale de faire une analyse du tenseur d'impédance, afin de déterminer la géométrie de la structure géologique. Dans le cas où la structure est 2-D, alors il est nécessaire de déterminer sa direction

structurale. Pour effectuer cette analyse Plusieurs techniques sont proposées, dont les plus utilisées sont la technique de Groom-Baily (1989 et 1991) et la technique de Bahr (1988 et 1991).

Plus récemment, une nouvelle approche a été proposée par Caldwell et al. (2004) dite méthode du tenseur de phase qui s'avère intéressante.

Le présent travail consiste en une analyse de la phase du tenseur d'impédance en utilisant la méthode du tenseur de phase, suivie d'une comparaison entre les résultats obtenus par la présente méthode et celles des méthodes classiques (Bahr 1988 et 1991, Groom-Baily 1989 et 1991). Pour ce faire, nous avons établi un programme informatique qui calcule le tenseur de phase magnétotellurique ainsi que ses différents paramètres. Le programme est rédigé en fortran 90 ; Il prend comme entrée les valeurs des champs électromagnétiques observés. Les paramètres de sorties sont l'angle de skew ( $\beta$ ) qui permet de faire une estimation de la dimensionnalité de la structure régionale, l'angle ( $\alpha$ ) qui donne l'inclinaison de la direction structurale dans le cas d'une structure régionale 2-D, les deux valeurs principales du tenseur de phase  $\Phi_{min}$  et  $\Phi_{max}$  qui représentent respectivement le petit et le grand axe de l'ellipse du tenseur, quand à l'angle  $\Theta$  il représente l'angle d'inclinaison de l'ellipse du tenseur de phase par rapport au système d'axe qui n'est que la direction préférentielle des courants d'induction.

Dans un premier temps, nous avons élaboré un modèle synthétique afin de tester la fiabilité du programme et voir le comportement du tenseur de phase et ses différents paramètres. Par la suite, Notre programme a été appliqué à des données réelles collectées lors d'une campagne magnétotellurique dans la région du Hoggar, ce qui a permis de mettre en évidence l'existence d'une structure géologique régionale bidimensionnelle, ces résultats ont été confirmés par les résultats obtenus par la méthode d'analyse de Bahr (1988 et 1991). Cette structure régionale a une direction du Strike quasiment NE-SW, ce qui a été renforcé par les résultats obtenus par la méthode d'analyse de Groom-Baily (1989 et 1991).

#### 10.4.10 (p) Levenberg Marquard based neural network model for Demeter Satellite Data with an application to ISL instrument data

Sid-Ali Ouadfeul<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Algerian Petroleum Institute, Boumerdes, Algérie

Here, we use the neural network to predict the ISL Langmuir Demeter satellite data. The machine is a Multilayer Perceptron model with three layers, the input layers is composed of four neurons, the output layers is composed of four neurons and a hidden layers of ten neurons. The training algorithm is the Levenberg Marquardt, obtained results clearly show the efficiency of the MLP machine in the prediction of ionospheric plasma parameters.

#### 10.4.11 (p) 2D Ground Penetrating Radar Data Filtering Using the Radial Basis Functions Neural Network

Leila Aliouane<sup>1</sup>, Sid-Ali Ouadfeul<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geophysics Department, Université Mahmed Bougara of Boumerdes, Algérie

<sup>2</sup>Algerian Petroleum Institute, Boumerdes, Algérie

The main goal of this paper is to use the so-called radial basis function (RBF) neural network for noise attenuation from the 2D GPR data. The whole process is based on the training of the RBF machine in a supervised mode. 2D GPR data without noise are used as an output of the

RBF machine, however the input is the same GPR data but with many signal to noise ratio. The training of the machine will provide weights of connection that can be used to filter other noisy GPR data. Application to real GPR data recorded in Algeria exhibits the power of the RBF neural network model as filter of the ground penetrating radar data.

#### **10.4.12 (p) Lithospheric structure of Serouanout Region (Hoggar, Southern Algeria) obtained by magnetotelluric data : first results**

Said Sofiane Bougchiche<sup>1</sup>, Abderrezak Bouzid<sup>1</sup>, Walid Boukhoulouf<sup>1</sup>,  
 Abdelhamid Bendekken<sup>2</sup>, Boualem Bayou<sup>1</sup>, Abdeslam Abtout<sup>1</sup>, Seid  
 Bourouis<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*CRAAG, Alger, Algérie*

<sup>2</sup>*Observatoire de Tamanrasset, Algérie*

The Hoggar massif (south of Algeria) shows wide bulge of the basement, covered in many places by Cenozoic volcanism whose origin is still debated. Also, the vertical movements of the earth's crust in this region indicate a lithospheric dynamics which is currently the scope of several studies. Serouanout region situated in the North-East of the massif on the top of the bulge, is located near the Anahef, which is the oldest volcanic district of the Hoggar of 35 Ma age (end of the Eocene). Furthermore, it is mainly characterized by the presence of sedimentary deposits of Cretaceous age that rests directly on the Precambrian basement and could indicate the presence of a Cretaceous basin prior to bulge. The aim of this study is to use electrical conductivity as a geological marker for modeling lithospheric structure, thus constrain the origin of volcanism and dynamics of the Hoggar lithosphere. This is accomplished using the magnetotelluric (MT) which is a passive geophysical method. It allows to estimate the electrical conductivity of the deep structure from the surface measurement of natural electromagnetic field. For this propose, MT data were collected in mars 2014 in 13 sites in the Serouanout region. The new sites complement an old recognition profile and allow to reduce the measuring step to about 10 km which improve substantially the lateral resolution of the data. All measuring stations form a NE-SW profile of 150 km long, crossing the Serouanout region from East to West. Also, to reach a depth of approximately 100 km, the natural electromagnetic field time series were recorded for about twenty hours at each site. In this work, we will present the first results of the analysis and interpretation of the magnetotelluric data.

## 10.5 Le Référentiel Géologique de la France

### Responsables :

- Thierry Baudin (BRGM) [t.baudin@brgm.fr](mailto:t.baudin@brgm.fr)
- Florence Cagnard (BRGM) [f.cagnard@brgm.fr](mailto:f.cagnard@brgm.fr)

### Résumé :

Depuis les années 50, la communauté des géosciences a été fortement impliquée au côté du BRGM dans le vaste programme du lever de la carte géologique de la France (1/50 000). Ce chantier de premier plan touche à sa fin et est aujourd'hui relayé par la mise en place d'un nouveau programme national intitulé Référentiel Géologique de la France.

Cette session sera l'occasion d'informer et de sensibiliser la communauté des géosciences sur les enjeux du RGF, de présenter sa mission, ses objectifs, sa mise en oeuvre ainsi que son organigramme et son Système d'Information. La session sera aussi le lieu de présentation des premiers produits du RGF issus de synthèses géologiques régionales.

Une thématique pourra être consacrée aux systèmes d'organisation de la données géologiques sur des exemples concrets (comment traiter la dimension temporelle dans une base, comment se référer à différentes échelles stratigraphiques, comment intégrer des notions de stratigraphie séquentielle ...).

### 10.5.1 (o) Du programme de la « Carte géologique de France » au « Référentiel Géologique de la France »

Jean-Marc Lardeaux<sup>1</sup>, Thierry Baudin<sup>2</sup>, Pol Guennoc<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia-Antipolis

<sup>2</sup>BRGM, Orléans

Le Référentiel Géologique de la France (RGF) est le nouveau programme national d'acquisition de la connaissance géologique du territoire français et de son environnement souterrain. Il est mis en place par le BRGM dans le cadre de sa mission de Service Géologique National et fédère les différentes institutions représentatives de la communauté des Géosciences.

Le RGF succède aux différents programmes de cartographie géologique en France, initiés en 1868, et achevés en 1971 pour l'échelle du 1/80.000 et en 2012 pour l'échelle du 1/50.000. Cette « œuvre collective de cartographie », à laquelle ont participé plus de 3000 géologues, a été un formidable instrument de connaissance de la géologie de la France à l'origine d'avancées scientifiques majeures réalisées par plusieurs générations de géologues. Outre son impact scientifique le programme de la « Carte géologique de France » a été aussi un remarquable instrument de formation des étudiants en géosciences.

Avec l'achèvement récent du lever des 1060 cartes au 1/50.000 une nouvelle époque s'ouvre pour notre communauté. En effet, l'évolution des concepts scientifiques d'une part et des besoins liés aux domaines d'application des géosciences d'autre part requiert le développement de modèles géologiques tridimensionnels basés sur une information géologique sans cesse actualisée et facilement accessible. C'est l'objectif du RGF : décrire l'environnement souterrain national en trois dimensions, en y ajoutant la dimension temporelle, dans un environnement accessible et évolutif qui prendra la forme d'une plateforme numérique unifiée et unitaire d'échanges d'informations.

Cette nouvelle démarche est une occasion exceptionnelle de relancer, à l'échelle nationale, les études sur plusieurs grands chantiers. C'est le cas notamment du chantier « Pyrénées », qui a été choisi comme première cible pour le RGF et qui aura valeur de démonstration.

### 10.5.2 (o) Principe et méthode du RGF : le chantier « pilote » Vosges - Fossé rhénan

Sunsearé Gabalda<sup>1</sup>, Equipe Rgf-Demo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>Ecole et Observatoire des sciences de la terre de Strasbourg

À la demande des instances du référentiel géologique de la France « RGF », un chantier de « démonstration » a été mis en œuvre pour tester sa faisabilité et sa pertinence : un défi pour le lancement de ce programme, réalisé en dix-huit mois.

Pour la première fois, les concepts, méthodes et produits envisagés lors de la conception du RGF ont pu être testés en grandeur nature sur un jeu de données géologiques d'emprise régionale, mettant en situation un grand nombre de thématiciens pour un retour d'expérience nécessaire aux déroulements des futurs chantiers régionaux.

Le choix de cette première mise en application s'est porté sur la région Vosges - Fossé rhénan qui offrait une grande diversité de terrains géologiques, de forages, de profils sismiques, de travaux géologiques récents qu'il a fallu rassembler et mettre en cohérence.

Le principe de mise en cohérence consiste à affecter un identifiant unique à toutes les entités géologiques identifiées, lithologiques ou structurales, qu'elles soient issues des cartes géologiques, des forages ou des profils sismiques. Ce mode de traitement nécessite l'établissement de lexiques lithostratigraphiques ou structuraux hiérarchisés afin

de couvrir les différentes échelles de consultation. Pour faire face aux problèmes de l'intégration, dans une base de données, des phénomènes géologiques transverses tels que le métamorphisme ou l'altération, la méthodologie conçue dans le cadre du RGF répond par une approche événementielle. Tous les marqueurs minéralogiques et structuraux, observés ou analysés sont ainsi liés dans le temps par un « événement ». La réalisation d'un lexique régional événementiel permet donc de tracer l'histoire de chaque entité géologique.

### 10.5.3 (o) Modélisation régionale dans le cadre du RGF - Application à la région « Vosges-Fossé Rhénan »

Cécile Allanic<sup>1</sup>, Gabriel Courrioux<sup>1</sup>, Sunsearé Gabalda<sup>1</sup>, Antonio Guillen<sup>1</sup>, Karel Schulmann<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>IPG Strasbourg

<sup>3</sup>Czech Geological Survey, Prague, République tchèque

La modélisation 3D est une étape incontournable pour la validation de la connaissance géologique. Les données traitées sont confrontées à l'interpolation géométrique dans un même espace tridimensionnel. Ceci permet de :

- vérifier, suivant un processus itératif la cohérence des données
- soulever de nouvelles questions pouvant valider ou remettre en cause certaines interprétations géologiques
- anticiper des besoins d'acquisition pour compléter de manière ciblée notre connaissance géologique.

Cette connaissance est représentée par un modèle qui intègre l'actualité scientifique de la région. Les données du chantier « pilote » Vosges - Fossé rhénan sont restituées par la base de données RGF qui fournit l'information géologique selon des regroupements adaptés à l'échelle de représentation. À cela s'ajoutent les données françaises issues du projet Interreg IV - GeORG pour contribuer à la réalisation d'une première version de modèle régional « Vosges-Rhin ».

Ces données significatives pour les premiers kilomètres de profondeur ( $\pm 2$  km), ont été associées au dernier modèle conceptuel d'architecture crustale des Vosges. Le résultat a été soumis à l'inversion gravimétrique pour tester la pertinence de la géométrie profonde ( $\pm 15$  km).

Il en résulte un modèle géométrique assorti des distributions de densités qui fournit une architecture de l'ensemble de la région sur laquelle peuvent s'appuyer d'autres études plus détaillées. Ce type d'approche globale est indispensable à la validation des mécanismes géodynamiques responsables de la structuration d'une région et reste une aide précieuse à la résolution de questions scientifiques et techniques majeures.

Cette démarche méthodologique, testée et validée dans le cadre du démonstrateur « Vosges-Fossé Rhénan », est désormais en application avec le lancement récent du chantier Pyrénées fédérant les résultats de projets de recherches multi-thématiques menées à différentes échelles en collaboration avec les universités.

### 10.5.4 (o) Structuration et stockage des données géologiques, démonstrateur du RGF

Damien Rambourg<sup>1</sup>, Equipe « rgf-Demo »<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

Les principes de mise en cohérence des données géologiques, établis dans le cadre du programme géologique RGF, constituent le socle méthodologique inhérent à ce programme.

Le BRGM a entrepris la conception d'une base de données de référence, permettant de stocker de manière pérenne des informations géologiques cohérentes, tout en conservant la traçabilité de la donnée brute,

quelle que soit son support d'observation et sa représentation géométrique. Cette base de données, B2D\_RGF, associée aux autres bases de données de références du BRGM (ex. Banque de données du Sous-Sol - BSS), a pour objectif de constituer une véritable mémoire géoscientifique à un niveau national, répondant à des critères d'interopérabilité internationaux.

La conception de cette base de données s'est déroulée pendant près de 5 ans, en étroite collaboration avec les acteurs thématiques, qu'ils soient fournisseurs ou utilisateurs de données géologiques. Ce travail a permis de qualifier les concepts géologiques communs à l'ensemble des thématiques géologiques et d'identifier les relations entre eux, sur la base de lexiques révisés et consolidés.

La structuration de l'information géologique relève de la mission des services géologiques. Suite aux retours d'expériences du programme de cartographie géologique à 1/50 000<sup>ème</sup>, l'un des problèmes majeurs soulevés concerne l'absence de stockage de la donnée géologique brute (telle que les acquisitions de terrains, par exemple) ainsi que la distinction entre les données factuelles et leurs interprétations.

Le Démonstrateur Vosges-Fossé rhénan a permis la mise en œuvre du stockage des données acquises, tout en validant et consolidant la cohérence du modèle de données dans une version v1.0, tout en introduisant la mise en place d'un Système d'Information RGF.

### 10.5.5 (o) Le système d'information du Référentiel Géologique de la France

Marc Urvois<sup>1</sup>, François Lyonnais<sup>1</sup>, Santiago Gabillard<sup>1</sup>, Damien Rambourg<sup>1</sup>, Florence Cagnard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

Le programme du Référentiel Géologique de la France (RGF) a vocation à anticiper et répondre aux nouvelles demandes sociétales impliquant le sol et le sous-sol (ressources, énergie, risques, urbanisation, pollution, ...). Le système d'information du RGF (SI RGF) dote ce programme scientifique national de l'ensemble des moyens informatiques, des applications et des outils pour répondre aux besoins des utilisateurs, depuis l'acquisition jusqu'à la diffusion des données et des connaissances.

Par la mise en place de cette infrastructure nationale d'informations géoréférencées pour le développement de la connaissance scientifique de la géologie de la France, il s'agit d'archiver et capitaliser les données de référence continues en 2D et 3D sur le territoire. Un tel système prévoit d'assurer la mise à jour permanente des informations géologiques en garantissant la traçabilité de l'évolution des interprétations.

L'éventail des bénéficiaires est très large puisqu'il inclut les producteurs et les utilisateurs des données du RGF, à la fois dans les domaines des géosciences fondamentales et appliquées, du monde académique, des services publics et des entreprises. Dans le respect des règles en vigueur sur l'accès aux données du secteur public, le SI RGF met à disposition des outils simples et évolutifs pour la gestion et la diffusion des lexiques et référentiels ainsi que pour l'alimentation et le partage des données brutes et interprétées d'échantillons, de forages et de cartes. Le portail web du RGF offre l'accès à des contenus éditoriaux, des outils de saisie et de consultation ainsi qu'à la plateforme OpenData de dépôt et de téléchargement.

Les retours d'expériences et le prototype du démonstrateur « Vosges-Fossé rhénan » ont été valorisés pour concevoir une architecture orientée services qui inclut des processus normalisés d'harmonisation et de validation des données de référence. Ainsi, le SI RGF est également un outil à la disposition de la gouvernance du programme du RGF, en commençant dès 2014 par le « Chantier Pyrénées ».

### 10.5.6 (o) Le chantier RGF Pyrénées : une communauté scientifique au service d'un programme

Thierry Baudin<sup>1</sup>, Jean-Marc Lardeaux<sup>2</sup>, Pol Guennoc<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

L'objectif du Référentiel Géologique de la France (RGF) est de restituer une connaissance géologique continue et cohérente sur l'ensemble du territoire. A l'instar du programme de la carte géologique de France, le RGF est un programme fédérateur des géosciences qui implique des chercheurs du BRGM, du monde académique et de l'industrie. Le RGF, établi sur plusieurs décennies, se structure autour de la réalisation successive de grands chantiers régionaux.

Le premier de ces chantiers, prévu pour une durée de cinq ans, a été choisi par le conseil scientifique du RGF et porte sur la chaîne pyrénéenne et ses avant-pays. L'établissement d'une information continue et homogène du sous-sol implique la mise en cohérence de nombreuses données régionales (cartographiques, sismiques, forages et géophysiques) couplées à l'acquisition de données supplémentaires. Le RGF ambitionne d'apporter des réponses adaptées à une demande socio-économique croissante. Une telle connaissance des milieux (géométrie, compositions, relations entre unités) implique qu'elle soit fondée et organisée sur les concepts scientifiques les plus avancés. C'est autour de ces questions majeures que se fédère la communauté scientifique rassemblant, sur un même domaine pyrénéen l'ensemble des disciplines des sciences de la Terre. Cette synergie qui intègre divers projets en cours, tel que l'ANR Pyramid, se concrétise d'ores et déjà par l'engagement d'une vingtaine de laboratoires de recherche hébergeant actuellement 9 thèses et une dizaine de masters. A travers ce chantier, toutes les thématiques scientifiques sont abordées et interagissent les unes avec les autres.

La chaîne pyrénéenne est issue de deux orogénèses, l'une varisque, l'autre alpine. De cette dualité géologique est née une dichotomie au sein de la communauté scientifique (varisque versus alpine). Le chantier Pyrénées devrait permettre une convergence de la recherche sur l'objet stratigraphiquement le plus complet de la géologie française.

### 10.5.7 (p) Interpretation sismique, forages et interopérabilité des modèles 3D dans le bassin molassique et la plaine de Pô : projet GeoMol

Laure Capar<sup>1</sup>, Renaud Couëffé<sup>1</sup>, Sunsearé Gabalda<sup>1</sup>, Roland Baumberger<sup>2</sup>, Agnès Brenot<sup>1</sup>, Alessandro Cagnoni<sup>3</sup>, Chiara D'ambrogio<sup>4</sup>, Chrystel Dezayes<sup>1</sup>, Gerold Diepolder<sup>5</sup>, Charlotte Fehn<sup>6</sup>, Gregor Götzl<sup>7</sup>, Andrej Lapanje<sup>8</sup>, Stéphane Marc<sup>1</sup>, Alberto Martini<sup>9</sup>, Fabio Carlo Molinari<sup>9</sup>, Edgar Nitsch<sup>6</sup>, Robert Pamer<sup>5</sup>, Marco Pantaloni<sup>4</sup>, Sebastian Pfeleiderer<sup>7</sup>, Andrea Piccin<sup>3</sup>, Nina Rman<sup>8</sup>, Nils Oesterling<sup>2</sup>, Isabel Rupf<sup>6</sup>, Günter Sokol<sup>6</sup>, Heiko Zumsprekelz<sup>6</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>Swisstopo, Waben, Suisse

<sup>3</sup>Direzione Generale Territorio Urbanistica, Milano, Italie

<sup>4</sup>Institute Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma, Italie

<sup>5</sup>Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, Allemagne

<sup>6</sup>Landesamt für Geologie Rohstoffe und Bergbau, Freiburg, Allemagne

<sup>7</sup>Geologische Bundesanstalt Fachabteilung Rohstoffgeologie Hydrogeologi, Vienna, Autriche

<sup>8</sup>Geoloski zavod Slovenije, Ljubljana, Slovénie

<sup>9</sup> *Regione Emilia-Romagna Servizio Geologico Sismico e dei Suoli,  
Bologna, Italie*

Le bassin molassique nord alpin s'étend depuis la France au Sud-Ouest, jusqu'en Autriche et République Tchèque au Nord-Est, et celui de la plaine du Pô en Italie en bassin sud alpin. Le projet transnational GeoMol se déroulant de septembre 2012 à Juin 2015 ([www.geomol.eu](http://www.geomol.eu)), cofinancé par le Programme de l'Espace Alpin, faisant partie de la Coopération Territoriale Européenne 2007-2013, comprend des partenaires allemands, autrichiens, français, italiens, slovènes et suisses. Les différents partenaires ont harmonisé plus de 28 000 km de données sismiques 2D et de nombreux forages pour construire des modèles géologiques 3D transfrontaliers cohérents qui ont pour objectif d'améliorer la compréhension de la géométrie des bassins et l'utilisation des ressources du sous-sol. Ces modèles géologiques réalisés à l'échelle européenne reposent principalement sur l'interprétation de profils sismiques de façon homogène et harmonisée et bénéficient donc des importants progrès récents en matière de traitement sismique. Ce travail d'harmonisation des données fait face à plusieurs difficultés : - Les variations topographiques (plus de 700 mètres entre l'Ouest et l'Est du bassin molassique) ; Au niveau du traitement, le principal enjeu reste l'harmonisation de toutes les lignes à un même niveau de référence, d'amplitude et d'étape de traitement afin de s'affranchir des erreurs aux points de croisement et des artefacts aux frontières. - Les hétérogénéités du sous-sol ; Une synthèse litho stratigraphique du remplissage du bassin molassique et de la Plaine du Pô, conduite à échelle européenne, permet de s'affranchir de ce problème et d'interpréter de façon cohérente toutes les données disponibles dans l'emprise de la zone d'étude. - La grande disparité dans la nature et la qualité des données sismiques (périodes d'acquisition, paramètres, données brutes vs données retraitées, ...). Les données ainsi obtenues permettent une meilleure définition des différentes structures tectoniques dans le détail, comme les chevauchements, plissements, etc., du schéma structural et des horizons géologiques en trois dimensions. Ainsi les géométries du bassin molassique nord alpin et de la plaine du Pô ont pu être améliorées. Un autre grand défi du projet GeoMol est l'interopérabilité des modèles obtenus par les pays partenaire construisant la partie du modèle 3D leur incombant.

by incorporating new data every day. The collective objective is to combine all models from different local areas, in order to obtain a consistent regional model.

Through this work students are sensitized to critical analysis of data, their relevance with respect to a modelling objective, up-scaling issues, estimation of uncertainties and model validation.

Statistical analysis of data covering the different sessions allow to infer different causes of uncertainty (spatial variability) and to estimate the acquisition data errors (human factors).

The analysis of differences and resemblances between models allows discriminating the impact of data variability, the impact of different field interpretations (including fault system interpretation), and the necessity to have simplification hypothesis and possible bias on the model. This contributes to identify and classify the uncertainty factors.

### 10.5.8 (p) Experience from 3D cartography training sessions. Implication for uncertainty factors identification

Gabriel Courrioux<sup>1</sup>, Bernard Bourguin<sup>1</sup>, Antonio Guillen<sup>1</sup>, Sunsearé Gabalda<sup>1</sup>, Thierry Baudin<sup>1</sup>, Frederic Lacquement<sup>1</sup>, Benjamin Le Bayon<sup>1</sup>, Jean Besse<sup>2</sup>, Didier Marquer<sup>3</sup>, Pierre Trap<sup>3</sup>, Philippe-Hervé Leloup<sup>4</sup>, Dimitri Schreiber<sup>1</sup>, Cécile Allanic<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BRGM, Orléans

<sup>2</sup>IPG Paris

<sup>3</sup>Chrono-environnement, Besançon

<sup>4</sup>LGLTPE, Lyon

This paper presents the feedback experience from twelve 3D cartography training sessions of ten days each with Master students, conducted by BRGM in the region of Alès (France). It aims at analyzing data and models acquired from these different sessions on the same geological objects.

The objective of the training is to reconcile traditional practice of cartography with 3D geological modelling technics. Students are faced to the exercise of « classical » geology : quality of observations, lithological facies recognition, structures and microstructures analysis, and field data acquisition ; as well to the integration of these field data into a 3D Geomodelling system.

The geological model and subsequent map are built in an iterative way

## 10.6 Médiation et patrimoine

Cette session résulte de la fusion des deux sessions initialement proposées ci-dessous. *This session results from the merge of the two following sessions initially proposed.*

### Médiation et patrimoine

#### Responsables :

- Claude Colleté (SGF) a.geol.aube@wanadoo.fr
- Patrick De Wewer (Museum d'histoire naturelle, Paris)  
pdewever@mnhn.fr
- Mireille Verna (SGF) mireille.verna@free.fr

#### Résumé :

Le patrimoine géologique fait partie intégrante du patrimoine naturel et des grands enjeux de société. L'état des Inventaires régionaux et nationaux, la législation actuelle et les avancées à envisager, la valorisation auprès du public et dans la formation des jeunes seront abordés à la lumière des expériences concrètes vécues par les acteurs sur le terrain. La nécessaire prise en compte des problèmes rencontrés par les décideurs locaux vis à vis des autres législations et des enjeux économiques et sociaux feront l'objet de communications ciblées. La médiation en direction de l'ensemble de la population abordera les principaux sujets des géosciences en relation avec les sujets de société. Transition énergétique, variation climatique, le sol, les minerais et les substances utiles pour l'homme, les matériaux feront l'objet des interventions des spécialistes de chaque domaine. Les communications aborderont aussi la problématique de l'acceptabilité par le public lors des choix d'aménagement du territoire. Les exposés de cas précis de démarche de formation et d'information sur des sujets de géosciences plus académiques permettront de comparer les méthodes et leurs résultats. La session sera aussi l'occasion pour les différents acteurs (associations, BRGM, CCSTI, musées, législateurs, élus locaux et régionaux ...) de se rencontrer et de partager leur savoir faire.

Sud-Ouest, des Pyrénées franco-espagnoles jusqu'au Seuil du Poitou et au Massif Central, onshore et offshore compris. Les communications traiteront, bien entendu, des grands sites géologiques en cours d'inventaire et de classification dans le cadre d'une coopération avec le Museum National d'Histoire Naturelle. Mais elles pourront également évoquer des roches, des affleurements, des gisements fossilifères, des séries, des formations, des structures, des aquifères, des paysages observables à l'air libre ou demeurés souterrains, dont la valeur mérite d'être portée à la connaissance des chercheurs spécialisés ou des enseignants, voire d'un public élargi, intéressé par les Sciences de la Terre. L'objectif visé par l'A.G.S.O. est de souligner, à travers les présentations et/ou posters acceptés, la richesse et la diversité de ces objets, justifiant pleinement la poursuite de recherches géologiques dans le Grand Sud-Ouest.

### La géodiversité du grand sud-ouest

#### Responsables :

- Association des Géologues du Sud-Ouest (A.G.S.O.), Joseph Canerot, jcanerot@live.fr
- Bertrand Fasentieux (Département des Géosciences, UPPA),  
bertrand.fasentieux@univ-pau.fr

#### Résumé :

Ce titre englobe tous les "objets géologiques" d'intérêt scientifique, patrimonial ou sociétal connus ou récemment découverts dans le Grand

### 10.6.1 (o) Les Fossiles : un patrimoine qui mérite des noms, amateurs et spécialistes peuvent -doivent- y contribuer. L'Association Géologique Auloise le met en pratique depuis plus de 30 ans

Claude Colleté<sup>1</sup>, René Jaffré<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Association Géologique Auloise, Sainte-Savine

Collecter, dégager, mettre en valeur les fossiles est ce qui motive essentiellement les amateurs. Ensuite, le devenir des spécimens peut varier : aller sur une étagère, dans une vitrine ou devenir un vrai témoin du passé en étant étiqueté, inventorié avec son lieu de récolte, sa position dans l'affleurement, son âge (si possible sa position dans la zonation de l'étage) et avec la détermination du genre et de l'espèce. La dernière étape étant la plus complexe et la plus difficile pour un amateur. Elle peut se faire avec l'entraide d'autres passionnés ou avec le concours de spécialistes.

L'A.G.A. agit dans ce sens depuis bientôt 40 ans avec du travail en groupe pour apprendre à distinguer les classes de fossiles (pour les débutants) ou pour déterminer spécifiquement les fossiles. Actions s'appuyant sur des écrits de membres de l'A.G.A. et de chercheurs spécialistes sollicités par l'A.G.A. Dans les années 1980, des notes signées par J. Sornay (Inocérames et Bélemnites), par H.A. Kollmann (Gastéropodes), par M. Fouray (Micraster), A. Boullier (Brachiopodes)... ont été publiées par l'A.G.A.

Depuis 1994 à l'initiative de René Jaffré, a été entrepris la rédaction de fiches descriptives d'espèces d'ammonites. Ces fiches pour aider à la détermination des ammonites jurassiques et crétacées, conçues pour les amateurs par des amateurs, rendent compréhensibles le vocabulaire technique par un texte concis et de nombreux schémas illustrant les caractères distinctifs de la coquille, de l'ornementation... et des photos avec des angles de vue variés.

Un premier tome avec 50 fiches est paru en 2007, le tome 2 avec 50 nouvelles espèces paraît en octobre 2014.

Cette fois-ci, il est signé René Jaffré, Bertrand Desanlis, Rémy Robineau et Jean-Marie Verrier, 4 amateurs de l'AGA.

Chaque détermination a été critiquée et validée par les ammonitologues des âges concernés, F. Amédéo, F. Atrops, P. Courville, S. Franiatte, P. Hantzpergue, P. Lacroix, C. Mangold, D. Marchand, S. Reboulet, L. Rulleau et J. Thierry. Par cette collaboration amateur-chercheur, l'A. G. A. propose un nouvel ouvrage pour que les passionnés de fossiles puissent reconnaître et déterminer leurs spécimens avec des écrits détaillés, référencés, rigoureux, corrigés, complétés et validés par les spécialistes concernés.

Une collaboration Amateurs-Spécialistes bénéfique pour le patrimoine paléontologique.

### 10.6.2 (o) Les fossiles de plantat

Philippe Raout<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Association Paléontologique du Bassin Aquitain, Saint-Médard-d'Eyrans

Une petite association d'amateurs de paléontologie a réhabilité un site identifié dans une note de 1874, qui mentionnait la découverte dans la région bordelaise de restes d'un mammifère marin et « de mollusques

tropicaux ». L'association a obtenu de la propriétaire du terrain l'autorisation de localiser le gisement sur le domaine. La démarche a abouti à la découverte d'un riche affleurement laguno-marin daté du Miocène inférieur.

Au-delà de la collecte raisonnée de spécimens par les membres de l'association, et des recherches documentaires classiques permettant leur identification spécifique, une succession de travaux a été entreprise par l'équipe d'amateurs, qui a souhaité suivre une démarche sérieuse et rigoureuse. La préservation et le balisage du site, le relevé de coupe, l'élargissement des recherches à toutes espèces présentes sur le site, puis un travail d'analyse du paléo-milieu ont permis au groupe d'aborder toutes les facettes de la protection et de l'étude d'un site. La mémoire de ces différents travaux a été sauvegardée dans une publication collective réalisée par l'équipe.

Diverses expositions ont été montées et des animations d'initiation à la paléontologie proposées sur le terrain même.

Ces résultats et spécimens ont été mis à disposition d'universitaires qui ont publiés des études complémentaires sur le site, concernant les coraux, les Ostracodes, les Miogypsines et les Bryozoaires de Plantat.

L'APBA est membre de CapTerre, affiliée à la Fédération Française Amateur de Minéralogie et Paléontologie et signataire d'un protocole avec le Maître d'Œuvre de la Ligne Grande Vitesse Tours-Bordeaux pour observer et accéder sous conditions aux travaux entrepris. Des démarches similaires sont en cours avec d'autres structures du domaine des travaux publics et de l'industrie des carrières.

### 10.6.3 (o) Fripon, Vigie-Ciel et la science participative

Monica Rotaru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> MNHN-Palais de la découverte, Paris

Le projet FRIPON (Fireball Recovery and Interplanetary Observations Network) financé par l'ANR s'appuie sur plus de 30 laboratoires de recherche. Il aura couvert la France d'un réseau de 100 caméras vidéo plein ciel à la fin de l'hiver 2015. En surveillant le ciel jour et nuit, son but premier est de détecter les bolides extraterrestres qui traversent l'atmosphère. Ses objectifs suivants sont de savoir d'où viennent et où tombent les météorites.

L'effet Doppler lié au trajet lumineux donne accès à la vitesse, donc au demi-grand axe de l'orbite. Ce couplage radio-optique conduira en quelques années à une moisson d'informations qui autorisera à définir finement les régions sources des météorites dans le Système solaire. Entirement automatisé, FRIPON calculera en quelques heures le lieu où atterrit la météorite avec une précision de l'ordre du km. Cependant, la chute se termine souvent en une pluie de pierres qui « sédimentent » sur une zone de quelques dizaines de kilomètres carrés. Les scientifiques seuls ne pourront jamais parcourir une telle surface.

C'est là qu'intervient le programme Vigie-Ciel où se combinent science participative et diffusion de la culture scientifique. Il va former des « re-trouveurs », capables d'accompagner les scientifiques sur le terrain pour récolter des météorites. Ces bénévoles apprendront à chercher en groupe de manière systématique, à reconnaître les objets, à les manipuler sur le terrain sans perturber leurs messages scientifiques, à comprendre l'intérêt de conserver les météorites dans les collections publiques. La formation repose sur des structures de médiation et des clubs de curieux en contact avec FRIPON munis de supports pédagogiques. Un site WEB sera mis en place, lieu d'échange entre tous les acteurs.

Au final, connaissant les sources et les objets, on saura mieux

contraindre les récents modèles planétaires exposés dans la présentation orale.

### 10.6.4 (o) La contribution des Géosciences à la connaissance et à la gestion des terroirs viticoles. L'exemple des AOC Madiran et Jurançon.

Jean Delfaud<sup>1</sup>, Bertrand Fasentieux<sup>2</sup>, Roger Sabrier<sup>1</sup>, Luc Blotin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Pau et des Pays de l'Adour, ex Professeur Emérite  
UPPA, Pau

<sup>2</sup> Département des Géosciences, Université de Pau et des Pays de  
l'Adour

<sup>3</sup> INAO, Pau

Le concept de terroir, élaboré en France et étendu à de nombreuses régions viticoles, repose sur des interactions entre un milieu physique et des savoir-faire. Il est très présent dans le piémont nord occidental des Pyrénées, un territoire très cloisonné où se développent de nombreux vignobles ayant une grande originalité.

Deux paramètres naturels se combinent : le climat local, lié à l'exposition et surtout au système de pente, et le complexe roche-altérité qui détermine l'enchaînement des sols le long des toposéquences. Les matériaux, essentiellement sédimentaires sont partiellement d'origine marine (les flyschs, rares dans les vignobles français) et des molasses continentales, carbonatées ou siliceuses. La nature et l'ampleur du manteau altéritique conditionne la profondeur de l'enracinement, la circulation hydrique, et les grands paramètres géochimiques qui déterminent la physiologie de la vigne.

La délimitation parcellaire conduite par l'INAO, une des bases de la définition des AOP viticoles, repose sur l'identification de ces paramètres. Quatre conditions sont défavorables : le froid, lié à l'altitude, le manque d'ensoleillement lié à l'exposition, la forte teneur en eau (hydromorphie) liée à une faible perméabilité ainsi qu'une trop grande fertilité. La toposéquence permet d'ordonner ces paramètres sur un versant.

Situés en avant des Pyrénées, les vignobles de Jurançon et de Madiran présentent les caractéristiques d'un piémont : une grande pluviométrie et des températures douces en été et en automne, liées au Foehn. Ils rendent nécessaires des cépages à peau épaisse : Tannat et Mansengs. Une géochimie variée résultant de la nature du sous sol et de la situation dans la pente, des pH variés, une large gamme de minéraux argileux et de matière organique, déterminent la fertilité et la conduite de la vigne. Ces données physiques, connues de longue date par les vigneron, mais objectivées récemment, participent à la typicité de ces vignobles. Elles s'expriment grâce à des pratiques œnologiques modernes. Il en résulte des vins typiques qui sont un reflet de l'harmonie des paysages résultant des interactions entre l'homme et la nature.

### 10.6.5 (o) L'inventaire du patrimoine géologique d'Aquitaine

Marie Le Casio<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Réserve naturelle géologique de Saucats-La Brède, Saucats-La Brède

De la Chaîne des Pyrénées à la Côte sableuse Atlantique en passant par les paysages calcaires du Périgord et du Lot-et-Garonne, l'Aquitaine est une région au patrimoine géologique varié. La Réserve Naturelle géologique de Saucats-La Brède a été choisie comme opérateur de l'inventaire du patrimoine géologique d'Aquitaine débuté en 2011. La méthodologie est basée sur celle proposée par le vade-mecum : une Commission Régionale du Patrimoine Géologique (CRPG) composé de : quatre géologues, un membre représentant de la DREAL et un membre représentant du Conseil Régional. Le choix a donc été d'avoir une CRPG

avec un nombre restreint de membres et d'avoir une Commission Départementale du Patrimoine Géologique par département avec des géologues spécialistes de chaque territoire, un membre représentant du Conseil Général et un membre représentant de la Direction Départementale des Territoires (et de la Mer). En effet, l'inventaire aquitain été rendu possible par un financement multiple : Etat, Région et Départements.

Dans un premier temps, 684 sites géologiques ont été identifiés, 548 ont été retenus et hiérarchisés. La première phase de ce travail d'inventaire est d'établir la listes des sites géologiques pour les 5 départements et d'en réaliser l'expertise.

A ce jour, les inventaires des départements de Gironde et Lot-et-Garonne sont réalisés, avec 34 sites pour le Lot-et-Garonne et 120 sites pour la Gironde. Les trois autres inventaires sont en cours. Les résultats provisoires seront présentés.

La deuxième phase consiste à réaliser la saisie sur la base de données IGETOPE et de valider régionalement ces 5 inventaires (méthodologie demandée par le CSRPN) et à assurer une mission d'animation : veille et sensibilisation auprès des acteurs locaux. Des exemples de valorisation seront présentés sur la Gironde, issue d'une collaboration étroite entre l'opérateur et l'association CAP Terre.

### 10.6.6 (o) L'inventaire national du Patrimoine Géologique

Grégoire Egoroff<sup>1</sup>, Patrick De Wever<sup>1</sup>, Annie Cornée<sup>1</sup>, Arnault Lalanne<sup>2</sup>

<sup>1</sup> MNHN, Paris

<sup>2</sup> Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie,  
Puteaux

La loi dite de la Démocratie de proximité du 27 février 2002, à travers l'article L.411-5 du code de l'environnement a institué l'« Inventaire du Patrimoine Naturel » sur l'ensemble du territoire. Elle énonce qu'on « entend par inventaire du patrimoine naturel l'inventaire des richesses écologiques, faunistiques, floristiques, géologiques, minéralogiques et paléontologiques ». Avec cette loi, la géologie, ou les sciences géologiques, sont ainsi clairement mentionnées pour une prise en compte dans le cadre du code de l'environnement. L'État s'obligeait lui-même à faire réaliser un inventaire, qui fut officiellement lancé en 2007.

À l'aube des refontes attendues du code de l'environnement et de la réaffirmation de l'intégration de la notion de Géodiversité dans le projet de Loi relatif à la biodiversité, il est apparu opportun de faire un état de l'avancement du travail d'inventaire national des richesses géologiques. Ce grand projet d'identification et de diffusion d'informations géologiques est décliné par régions, qui effectuent le travail. La loi impose que le Muséum national d'Histoire naturelle assure la validation scientifique nationale des informations, et leur diffusion au travers du site internet de l'INPN (Inventaire National du Patrimoine Naturel) qui est la plate-forme nationale des données biodiversité et géodiversité françaises.

Nous présenterons un rappel de la loi et de son contexte, et de la méthodologie de l'inventaire national du patrimoine géologique. Cette méthodologie fournit des précisions aussi bien sur les informations attendues dans la description d'un site, que sur la mise en œuvre de l'inventaire en région ou la circulation de l'information. Nous finirons par un état des lieux de l'avancement des inventaires en régions.

### 10.6.7 (o) Analyse comparative de quelques inventaires géologiques en Europe

Inès Alterio<sup>1</sup>, Patrick De Wever<sup>1</sup>, Grégoire Egoroff<sup>1</sup>, Annie Cornée<sup>1</sup>

<sup>1</sup> MNHN, Paris

La loi du 27 février 2002, relative à la démocratie de proximité, a donné corps à l'inventaire national du patrimoine géologique en France, qui a été officiellement lancé en 2007.

Afin de positionner cet inventaire par rapport à ce qui se faisait dans d'autres pays européens, une comparaison a été menée. Dans un premier temps nous avons sélectionné quatre pays de cultures différentes (Espagne, Finlande, Royaume-Uni et Tchéquie). Notre analyse a porté sur les motivations, le contexte, les acteurs, la méthodologie, l'échelle, l'acception des termes, le contenu ... Une attention particulière a été accordée aux critères de sélection des sites géologiques ainsi qu'aux différents moyens de diffusion employés.

Il ressort qu'il existe globalement trois raisons qui ont motivé les inventaires du patrimoine géologique en Europe :

- la connaissance scientifique,
- la protection du patrimoine géologique, et
- le développement économique d'une localité.

Les inventaires ont été menés à différentes échelles, parfois tranchées : internationale (Espagne), nationale (Tchéquie, Finlande), régionale ou non (France, Royaume-Uni).

Il existe plusieurs types d'inventaires :

- organisés autour de *n* frameworks *z* caractéristiques de l'histoire géologique d'un pays, (Carbonifère de la zone cantabrique)
- réalisés selon la nature des formations géologiques (ex. moraines, formations éoliennes) et enfin
- effectués de manière systématique (sites d'intérêt géologique s.l.).

Les critères d'évaluation des sites se regroupent autour de trois thèmes communs à presque toutes les méthodologies : l'intérêt scientifique et pédagogique, les intérêts annexes (esthétique, culturel, économique ...) et la vulnérabilité. Souvent, les sites sélectionnés sont évalués numériquement et classés par degré d'importance scientifique et/ou de vulnérabilité. Enfin, ces inventaires sont diffusés sous forme de publications ou de fiches descriptives, de bases de données en ligne de taille très variable (de 1 à 12 pages selon les pays).

### 10.6.8 (o) Paysages et patrimoine géologiques du Parc National des Pyrénées

Joseph Canérot<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

Le Parc National des Pyrénées offre aux nombreux visiteurs qui le fréquentent une multitude de paysages géologiques qui, par leur identité et leur diversité, illustrent parfaitement les traits essentiels d'une chaîne de montagne jeune. A côté des paysages prestigieux, tels ceux de Gavarnie et du Mont Perdu, classés au Patrimoine Mondial de l'Humanité, existent en effet de nombreux sites dignes d'intérêt, qui s'intègrent harmonieusement dans un schéma d'évolution géodynamique régional cohérent, courant sur quelques 300 millions d'années. L'objectif de cette présentation est de montrer la logique de l'enchaînement des phénomènes qui ont conduit à l'élaboration de ces paysages. L'idée est de mettre en lumière certains aspects spécifiques, peu connus ou controversés de l'histoire géologique « alpine » des Pyrénées, chaîne indéfinissable en termes de tectonique des plaques dans la mesure où elle résulte de l'inversion d'un rift méso-crétacé à croûte continentale amincie certes mais continue.

### 10.6.9 (o) Les Geoparks et le développement des Geoparks en France

Anne Guyomard<sup>1</sup>, Christophe Lansigu<sup>2</sup>, Stéphane Legal<sup>3</sup>, Guy Martigny<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Geopark Chablais, SIAC, Thonon-les-Bains Cedex

<sup>2</sup>Geopark des Bauges, Parc Naturel Régional du Massif des Bauges, Le Châtelard

<sup>3</sup>Geopark du Luberon, Parc naturel régional du Luberon, Apt

<sup>4</sup>Geopark de la Réserve Géologique de Haute-Provence, Réserve Géologique de Haute-Provence, Digne les Bains

Les Geoparks sont des territoires ayant un patrimoine géologique d'intérêt international mais loin d'être des « musées géologiques à ciel ouvert » ils maillent cette « mémoire de la Terre » avec les autres composantes patrimoniales territoriales. Patrimoine géologique, naturel, culturel tangible et intangible doivent y être valorisés pour la mise en place de stratégies de développement économique durable et intégré.

Les Geoparks sont nés en 2000 de 4 territoires européens, la réserve naturelle de Digne les Bains (Fr), la forêt pétrifiée de Lesbos (Gr), le Parc Naturel de Maestrazgo (Es), et le Geopark Gerolstein Vulkaneifel (All). Aujourd'hui, le réseau mondial des Geoparks (GGN) compte 100 territoires dont 58 Geoparks en Europe constituant le réseau européen (EGN).

L'évolution du nombre de Geoparks et du fonctionnement du GGN a conduit à la création de forums nationaux. Les 4 Geoparks français viennent de se regrouper au sein du forum Français. L'un des objectifs est de développer une réflexion commune, mutualiser des moyens et assister les futures candidatures nationales.

Pour nombreux géoscientifiques, et acteurs politique le terme "geo" de geopark est confondue avec "géologie" au sens large du terme, hors l'objectif des Geoparks est de permettre aux habitants, visiteurs, de s'approprier, ou de se réapproprier leur territoire et d'y vivre. Dans les Geoparks cela passe par une meilleure connaissance des patrimoines de la Terre en proposant un regard nouveau et en permettant aux territoires de se développer durablement. Pour cela 3 axes sont privilégiés : (i) la connaissance et la préservation des entités géologiques remarquables mais aussi naturelles, culturelles (matérielles, immatérielles) ; (ii) la vulgarisation des connaissances scientifiques grâce à divers médias d'interprétation (mises en valeur de géosites, sentiers thématiques, visites guidées, expositions, formations,...) ; (iii) l'émergence de nouvelles activités liées au développement d'un tourisme doux dit géotourisme.

Lors de notre présentation après avoir détaillé les fondamentaux des Geoparks nous préciserons la place de la géologie et des géoscientifiques dans les Geoparks. Puis nous nous attacherons à présenter le développement actuel des Geoparks en France. Enfin, nous terminerons en développant le statut des Geoparks au sein de l'UNESCO et les évolutions que les territoires Geoparks souhaitent de ce statut.

### 10.6.10 (o) Intérêt patrimonial des carrières

Raymond Cussey<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ingénieur géologue pétrolier retraité TotalFinaElf, Lescar

Dans les Pyrénées Atlantiques, nombre de carrières en exploitation sont situées dans des zones privilégiées à fort potentiel géologique et patrimonial. Elles offrent l'intérêt majeur d'un examen continu en 3D et permettent de découvrir des phénomènes géologiques invisibles ou seulement suggérés en surface. Elles sont souvent localisées dans des zones d'intérêt géologique particulier.

C'est ainsi qu'il est possible d'observer des phases tectoniques pyrénéennes dans une écaille (Arbouet) ou la compression pyrénéenne à travers un réseau de failles et un magnifique miroir de faille (Bergouey). L'étude d'un dyke d'ophites, coïncé entre du Primaire et de l'Albien, ainsi que l'analyse d'une discontinuité remarquable (Souzaïde) permettraient de comprendre certaines des relations entre les ophites et les calcaires de l'Albien.

Une excellente coupe de flysch (Urrugne) met en évidence différents types d'apports turbiditiques dans le bassin ainsi que la complexité

d'une méga-turbidite et des surfaces d'inondation maximale. Un exemple exceptionnel de migration et de piégeage d'hydrocarbures contre un diapir (Cassaber) permet de montrer un réservoir à hydrocarbures à l'affleurement.

Enfin, un lapiazage intra-Albien, avec ses phases de remplissage minéralogique fluoré (Arbouet), a pu être mis en évidence.

Suivi et valorisation patrimoniale des carrières

Les carrières en cours d'exploitation devraient faire l'objet de conventions entre l'exploitant et des géologues référents, pour un suivi régulier des données mises à jour, au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

Après cessation de l'activité, il serait nécessaire de mettre en œuvre une politique de concertation pour garder une partie des témoins géologiques et éviter leur disparition totale, liée au type actuel de réhabilitation : comblement partiel, talutage et végétalisation.

### 10.6.11 (o) Problématique de simplification des cartes géologiques. Exemple pour le Géopark du Chablais

Michel Marthaler<sup>1</sup>, Anne Guyomard<sup>2</sup>, Simon Martin<sup>1</sup>, Nicolas Kramar<sup>3</sup>, Amandine Perret<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Lausanne, Suisse

<sup>2</sup> Geopark Chablais, Thonon les Bains

<sup>3</sup> Musée de la Nature, Sion, Suisse

Simplifier une carte géologique (à l'échelle du 1 : 50 000) est un processus compliqué. La carte elle-même, la légende, l'esquisse tectonique, les coupes et le texte de la notice explicative sont remplis de termes et de concepts implicites qu'utilisent les géologues entre eux, mais qui sont incompréhensibles pour le grand public.

Prenons un seul exemple, les couleurs, derrière lesquelles se cachent plusieurs significations. Concernant les roches sédimentaires d'abord (la stratigraphie) c'est la notion de temps qui domine (et non le type de roche). Pour le géologue, c'est une évidence que le temps se déroule de bas en haut, que les couches s'empilent à l'horizontale, et donc que les couleurs de la légende se superposent.

Mais le grand public voit plutôt le temps se dérouler de gauche à droite...ou autour d'un cercle comme celui de l'horloge.

Concernant la tectonique ensuite, surtout dans une région montagneuse, d'autres couleurs représentent des ensembles de roches, en général des nappes, notion très complexe à faire saisir du grand public : un deuxième empilement qui se rajoute à celui de la sédimentation !

Enfin, il y a tous les signes et les couleurs pastels du Quaternaire. Ces derniers dépôts dus à l'érosion, viennent cacher (sur la carte comme sur le terrain) les roches sous-jacentes. La notion d'affleurement rocheux est difficile à faire comprendre sans avoir soi-même pratiqué du levé de terrain.

Cet exposé voudrait donc ouvrir quelques pistes, montrer surtout quelques réalisations concrètes en vue d'amener les amateurs, les enseignants, les guides et accompagnateurs en montagne à comprendre toute la richesse d'une carte géologique. Simplifiée, une carte géologique peut devenir une porte d'entrée (plutôt qu'un épouvantail) au monde des sciences de la Terre.

### 10.6.12 (o) Dessins animés et outils multimédia au service des géosciences appliquées

Christophe Lansigu<sup>1</sup>, Valérie Bosse<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Geografis laterre en dessins, Courmols

<sup>2</sup> LMV, Clermont-Ferrand

Les Géosciences offrent une clé de lecture incomparable à la compréhension de nos territoires. Elles apportent un éclairage puissant sur la nature et la gestion des ressources naturelles. Elles permettent également une mise en tourisme éclairée de territoires et de patrimoines naturels. Pour devenir cet outil de médiation et de promotion, il est toutefois nécessaire de réussir la mise en médiation de son sujet et d'éviter les écueils des approches trop rébarbatives. A l'heure de l'instantanéité, de la soif de loisir et d'expérience, intéresser le grand public à une science qui peut sembler demander temps et réflexion peut sembler une gageure. Pour séduire et interpeller, au delà du cercle restreint des passionnés, le recours aux supports vidéos et animés peut s'avérer un précieux auxiliaire. Sept années de réalisations au sein de la LaTerreEnDessins (1) ont permis d'expérimenter différents environnements et supports de médiations appliqués à des contextes variés, espaces muséographiques, sentiers d'interprétation, Internet. Des contraintes et des objectifs variés qui permettent d'apprécier des arbitrages entre exigence de contenu et facilité de compréhension pour un large public. Différents projets, Muséum d'histoire naturelle, Musée archéologiques Espace muséographique de la coopérative laitière de Beaufort, Espace d'information de la Société des Eaux de Volvic ont permis d'expérimenter et d'évaluer une palette de possibilités LaTerreEnDessins (1) et de discuter les conditions de réussite de médiation en Géosciences (Lansigu et al, 2014)(2). Une expérience qui permet d'envisager de nouveaux positionnements en terme de conseils et d'accompagnement de territoire sur la médiation en Géosciences. Une expérience dont on peut aussi tirer des enseignements en terme de médiation scientifique sur des sujets de société, à l'heure par exemple de la redécouverte de notre patrimoine minier ou d'interrogation sociétale sur les changements climatiques et l'épuisement des ressources naturelles.

### 10.6.13 (o) Des vidéos sur téléphones intelligents : un vecteur de transmission du savoir utilisable sur le terrain

Claude Bacchiana<sup>1</sup>, Mireille Verna<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CAP Terre, SGF, Talence

Le projet initial, conçu par le Pr. Thierry Mulder en 2007, n'aurait pu exister sans la logistique de l'association Capterre et le soutien financier de Total. Au départ, il était prévu de réaliser des panneaux géologiques de Bayonne à Hendaye. A la suite d'une rencontre avec le Conseil Général 64, l'idée de créer de courtes vidéos est devenue une évidence. Cependant la complexité du système proposé, avec déclenchement par GPS et l'utilisation de boîtiers numériques en nombres limités, nous a détournés de cette approche. L'arrivée massive des téléphones intelligents et la généralisation des codes QR nous a permis une diffusion beaucoup plus large. Il nous a aussi semblé opportun d'organiser les vidéos en circuits de 2 à 4 km. Le soutien du maire de Guéthary et l'aide d'un conseiller municipal ont assuré le succès de cette entreprise. Notons que le soutien des politiques locaux est indispensable pour réaliser ce genre de projet.

Trois circuits existent à ce jour. Prés de Guéthary et sur la commune d'Anglet. Le déclenchement des vidéos peut se faire soit à partir des codes QR qui figurent sur les dépliants disponibles dans les offices de tourisme soit directement collés sur les affleurements.

La plupart des vidéos ont été tournées sur les affleurements et complétées de schémas explicatifs. Le tournage en extérieur nécessite de prendre des précautions, en particulier au niveau du son. L'utilisation d'un micro-cravate est indispensable car les bruits extérieurs rendent vite la bande son inaudible. Les conditions atmosphériques sont aussi à prendre en considération.

L'iconographie doit rester simple et lisible du fait de la taille de l'écran. L'utilisation de schémas extraits de publications doit prendre en compte la propriété intellectuelle. La durée des vidéos ne doit pas excéder 3mn

car le public arrête facilement une vidéo un peu longue. En conclusion, la vidéo est un puissant vecteur de connaissances servi par une technologie de plus en plus puissante. Elle se prête bien à une utilisation individuelle sans le secours d'un professeur. Son coût est limité et sa réalisation à la portée de tous grâce aux logiciels de montage. Sa diffusion est universelle et de plusieurs ordres de grandeur supérieure à celle de panneaux.

### 10.6.14 (o) Géofestival®, un événement festif et pédagogique qui crée des liens par la Géologie!

Gilles De Broucker<sup>1</sup>, Marc Lucas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Beaufortain *Géo Découvertes, Géoregards, Beaufort-sur-Doron*

<sup>2</sup>Géomnis, *Ecole des Mines ParisTech, Paris*

Le Géofestival® est un concept innovant créé par l'Association Géomnis, en collaboration avec l'Ecole des Mines ParisTech. C'est un événement festif et pédagogique, qui a pour objectif de :

- sensibiliser au lien entre les activités humaines, la biodiversité et le sol avec sa géologie. Trop souvent le minéral est oublié alors qu'il structure les paysages, conditionne la flore et la faune et détermine les territoires ;
- créer des « regards croisés » entre les savoirs locaux et les sciences, les partager avec tous, habitants et visiteurs, en s'adressant à tous les publics de façon accessible ;

- voir autrement le territoire que nous habitons ou visitons et le valoriser comme un patrimoine naturel ET culturel sans opposer les deux aspects. La première édition du Géofestival® s'est tenue en 2009, en Bretagne, afin de rendre visible et fédérer un territoire, la « Bretagne de grès rose » qui s'étend d'Erquy au Cap Fréhel sur la côte Nord. La manifestation met en valeur le travail réalisé durant l'année, par des habitants du territoire, des scolaires aux plus anciens. Le Géofestival® a déjà essaimé à Fontainebleau et dans le Gâtinais associant une Réserve de Biosphère Unesco, le château de Fontainebleau, le Parc Naturel Régional et de très nombreux acteurs sur 126 communes. En 2011 un premier Géofestival alpin est organisé en Beaufortain sur le thème : « comprendre la géologie des barrages » autour des festivités du 50ème anniversaire du barrage de Roselend. Suite au succès de ce premier Géofestival alpin, il a été décidé de renouveler cet événement festif tous les deux ans. Le sujet du 2ème Géofestival du Beaufortain au cours de l'été 2013 fut « Des pierres et des Hommes en Beaufortain », mettant en valeur le travail des hommes explorant ou exploitant toutes les pierres utiles du massif. Le thème retenu pour 2015 est : « De la roche au végétal en Beaufortain ».

Le Géofestival® se développe au niveau international, au travers d'une approche environnementale multiculturelle, avec une exposition « Un art des pierres », présentée durant l'été 2011 dans le Geopark Unesco de Brecon Beacons au Pays de Galles. Des contacts sont en cours en Chine et au Japon.

### 10.6.15 (o) La valorisation de géosites ou « comment passer d'un sentier d'interprétation à un projet de territoire de 23 géosites aménagés ? »

Anne Guyomard<sup>1</sup>, Natacha Nugue<sup>1</sup>, Sophie Justice<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geopark Chablais, SIAC, EDYTEM, Thonon-les-Bains

<sup>2</sup>Géologie Consultante, Geopark Chablais, St Jean d'Aulps

Le Geopark du Chablais membre du réseau des Geoparks européens et mondiaux depuis 2012 est situé en rive Sud du Léman. Il s'étend sur

870km<sup>2</sup> et comprend 62 communes. Dans le cadre des actions des valorisations, les acteurs du territoire croisent histoire de la Terre et histoire des hommes : le bâti traditionnel, l'usage de la montagne, la vie en alpage, les contes et légendes, les richesses naturelles et les produits du terroir sont autant de témoins forts des liens entre l'homme et la nature. Une géoroute valorisant 23 géosites remarquables et leurs patrimoines associés a été créée. Cette présentation a pour objectif d'exposer et d'analyser les modalités de mise en oeuvre de cette route géotouristique comme projet de territoire.

Comment passer d'un site reconnu par les géoscientifiques à un site géotouristique ? Quels sont les enjeux territoriaux rencontrés ? Comment parvenir à une valorisation qui réponde aux attentes et exigences des scientifiques d'une part, mais aussi des collectivités et encore du public. Comment dépasser ces images : « la géologie est une affaire de spécialiste », « la valorisation est une dénaturation ». Quelles rencontres possibles entre géoscientifiques et élus dans un domaine où chacun a des visions du territoire qui peuvent sembler divergentes, mais qui pourtant se rejoignent dans un attachement affectif au territoire et une volonté de valoriser et de donner à découvrir ?

Autant de questions inhérentes à un Geopark dont les réponses passent par une forte coopération mutuelle. Ces clés seront développées à travers l'exemple de la mise en place de la géoroute du Chablais et ses perspectives de développement futur.

### 10.6.16 (o) Contribution d'un élu pour la valorisation du patrimoine géologique de la côte Basque

Jean Choignard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Cap Terre, Talence

Cela s'est vérifié avec CAP Terre qui réunit les universitaires, T. Mulder et P. Razin, des étudiants, des enseignants et des géologues seniors. Le géologue local assurant la logistique et le relais avec la presse et les autorités. Le projet de CAP Terre, réalisation d'une Route Géologique du Littoral Basque z consistait à poser 15 panneaux informatifs entre Bayonne et Hendaye. Il était financé presque entièrement par Total. Geolval a prêté son concours au départ. Le Conseil Général 64 l'a soutenu.

Sur 9 communes contactées en 2008, seules 2 acceptèrent des panneaux. Les 1ers pupitres furent installés à Guéthary grâce au maire. Après l'inauguration des panneaux en 2010, d'autres communes suivirent. A présent 9 panneaux sont posés, les derniers devraient l'être bientôt, placer ces panneaux à des endroits précis nécessitant diplomatie et patience. A noter des refus d'installation sur les domaines du Conservatoire du Littoral et du château d'Abbadia, propriété de l'Académie des Sciences. Une maison d'information du Sentier du Littoral, créée à l'initiative du Conseil Général ouvrira fin 2014, avec une salle de géologie.

Parallèlement, CAP Terre a ouvert 3 promenades/vidéos géologiques autour de Guéthary et à Anglet (vidéos, avec guide et résumé papier, consultables sur le terrain par smartphones/codes QR ou de chez soi).

La valorisation du géopatrimoine est minimale comparée à celle du littoral espagnol : un Géoparc, 3 musées géologiques, une route du flysch, événements festifs sur des nouveaux stratotypes, nombreuses publications. Ces réalisations traduisent une collaboration entre collectivités et scientifiques efficace et mieux coordonnée que chez nous.

Pour l'avenir, CAP Terre a posé des jalons auprès de l'agglomération du Sud Pays pour la création avec les Espagnols d'un Géoparc littoral, du Jaizkibel jusqu'à Biarritz : falaises de flysch, cicatrice du contact anormal Trias/Crétacé, l'affleurement de la limite K/T de Bidart... En résumé, un géologue au sein d'une collectivité territoriale est utile s'il s'appuie sur une équipe solide. Sa fonction lui permet un meilleur suivi des actions, de surmonter les blocages et de faire prendre en compte des

initiatives d'avenir pour la valorisation du patrimoine géologique d'une région.

### 10.6.17 (o) Synopsis du nouveau concours du CAPES pour le recrutement des enseignants en Sciences de la Vie et de la Terre

Michel Corsini<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*GEOAZUR, Sophia Antipolis*

La récente réforme du concours du CAPES a profondément changé les modalités de recrutement des futurs enseignants du secondaire en introduisant de nouvelles épreuves susceptibles d'évaluer les compétences professionnelles des candidats.

Un des points importants de cette réforme a été de placer les épreuves d'admission et d'admissibilité en première année du Master, alors qu'elles se déroulaient auparavant en seconde année. La diminution de la durée de la formation constitue aujourd'hui une véritable difficulté pour porter les étudiants à un niveau de compétences satisfaisant pour un futur enseignant en Sciences de la Vie et de la Terre. Ce changement de calendrier nécessite une complète réorganisation de la formation au concours et la création de filières spécialisées dès la licence.

Concernant les modalités de l'admissibilité, une nouvelle épreuve a été introduite. Cette épreuve écrite repose sur l'analyse de documents reliant connaissances scientifiques, histoire des sciences et pédagogie. Elle vise à mettre les candidats en réflexion sur l'origine des savoirs qui figurent dans les programmes des lycées et collèges.

Les épreuves d'admission ont également été profondément modifiées et elles sont désormais fortement orientées sur les aspects professionnels.

Un premier oral consiste en une leçon sur un thème choisi dans les programmes des lycées et des collèges avec la réalisation par le candidat d'une manipulation centrée sur l'activité de l'élève. Le second oral est un entretien avec le jury s'appuyant sur des documents relatifs à des séquences de classe.

Ces modifications des modalités du concours ont des répercussions fortes sur la formation des étudiants. Des stages en établissement scolaire sont maintenant réalisés de manière régulière au cours du cursus de formation en licence et en master. Ces stages permettent aux étudiants de prendre contact directement avec le métier.

### 10.6.18 (p) Graines de paléontologues : un partenariat entre scolaires et chercheurs universitaires

Thierry Pélissier<sup>1</sup>, Patrick De Wever<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*GET, Toulouse*

<sup>2</sup>*Muséum national d'histoire naturelle, Paris*

Les anciennes exploitations de phosphate du Quercy sont célèbres pour leur richesse (abondance, diversité et qualité de la fossilisation) paléontologique. Cet ensemble, connu dès le XIX<sup>e</sup> siècle et largement étudié dans les années 1970/1980 réserve encore bien des surprises. C'est le cas du gisement de Valbro, découvert en 2000, qui présente la particularité d'associer plusieurs remplissages en place et un important déblai, tous riches en pièces fossiles.

Les modalités pratiques.

Dans le cadre d'un partenariat avec les établissements scolaires volontaires, du sédiment leur a été fourni gracieusement. Au cours de séances de Travaux Pratiques, il a été possible d'en extraire les restes fossiles qui ont été restitués en fin d'année scolaire et intégrés aux travaux en cours sur le gisement. L'opération initiée à la rentrée 2009 se poursuit encore en 2013/2014. Trente-deux établissements secondaires y ont participé.

Même s'ils ont eu au départ quelques difficultés à repérer les fossiles, tous les élèves impliqués ont apprécié la démarche : « on ne trie pas pour trier ». Ils se sont montrés motivés et actifs, comprenant sans problème la nécessité de restituer leurs trouvailles et fiers de contribuer ainsi « à faire avancer la science ».

Les résultats.

Valbro a livré une faune de vertébrés d'âge Oligocène inférieur (MP22). Avec 11 taxons de rongeurs et 13 de carnassiers, Avec une dizaine de squamates ou amphibiens, trois oiseaux et au moins quarante-trois mammifères (11 rongeurs, 14 carnassiers, 2 marsupiaux, 1 insectivore, au moins 5 chiroptères, 5 périsodactyles et au moins 6 artiodactyles), Valbro constitue d'ores et déjà le gisement le plus riche et diversifié du niveau MP22 et se place incontestablement parmi les gisements les plus riches et diversifiés pour l'Oligocène inférieur d'Europe.

### 10.6.19 (p) Le geopark des Bauges, de la connaissance du territoire à l'outil de promotion touristique

Christophe Lansigu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Geopark des Bauges, Parc Naturel Régional du Massif des Bauges, Le Châtelard*

Le Parc naturel régional du Massif des Bauges a obtenu la labellisation Global Geopark en 2011. Il est ainsi aujourd'hui membre actifs des réseaux européen et international des Geoparks, soutenus par l'UNESCO. Une démarche qui vise à remettre le patrimoine de la Terre au cœur des enjeux de connaissance et de promotion du territoire par une réappropriation de son histoire et de ses particularités géologiques.

Entre le Lac d'Annecy et le Lac du Bourget, plus grands lacs naturels et plus grands réservoirs d'eau douce de France, le massif des Bauges appartient aux chaînes subalpines. Remarquable par ses magnifiques synclinaux perchés et ses vastes réseaux karstiques, il offre une géologie à la fois simple et spectaculaire, propre à positionner la géologie comme clé de lecture du territoire. Il offre à voir et à comprendre, le fonctionnement de remarquables systèmes hydrogéologiques en milieux karstiques.

Outil de promotion touristique pour la lisibilité du massif, c'est surtout une manière d'associer tous les acteurs du territoire à un projet partagé. Une démarche qui permet à chacun selon activité ou sa place dans l'organisation du territoire, élus, techniciens ou acteurs économiques, de s'approprier le territoire et de d'y développer sa relation à la Terre. L'inventaire et la valorisation de 54 geosites participent à un maillage du territoire. Ces geosites, témoins de l'histoire géologique du massif, ou du parti qu'a su en tirer l'homme au cours de sa propre histoire, témoignent d'une relation étroite de l'homme à son environnement. Une relation de l'homme à la Terre prétexte à une démarche de mise en tourisme qualitative qui vise à mettre en lumière l'identité du territoire et renforcer son attractivité touristique. La poursuite d'activités de recherche, avec notamment des conventions avec l'Université de Savoie (laboratoire Edytem) et les comités départementaux de spéléologie 73 et 74 permet d'entretenir l'acquisition de connaissances et la réflexion sur la mise en médiation de l'information scientifique et naturaliste. Une démarche exemplaire dont l'ambition est d'entraîner une véritable dynamique territoriale.

### 10.6.20 (p) Carte géologique à 1/250 000 de la région Midi-Pyrénées

Bernard Monod<sup>1</sup>, Frédéric Chêne<sup>2</sup>, Benjamin Le Bayon<sup>2</sup>, Philippe Chevremont<sup>2</sup>, Isabelle Bouroullec<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*BRGM, Direction régionale Midi-Pyrénées, Ramonville-Saint-Agne*

<sup>2</sup>*BRGM, Orléans*

La Région Midi-Pyrénées étend son territoire sur trois objets géologiques majeurs du grand sud-ouest : le Massif Central, le Bassin d'Aquitaine, les Pyrénées. La cartographie géologique de la région est assurée par un peu plus d'une centaine de cartes à 1/50 000 produite par le BRGM. Le projet GARVEMIP (Géologie harmonisée et vectorisée de Midi-Pyrénées) a permis de réaliser, à partir de ces cartes, une carte synthétique de la région Midi-Pyrénées à l'échelle 1/250 000. Ce document retrace l'histoire des terrains façonnés par les cycles orogéniques successifs d'abord hercyniens, puis pyrénéens, jusqu'à nos jours. La carte produite est numérique, composée de fichiers vecteur. La mobilisation de subventions de l'Etat, via le Fonds National d'Aménagement et de Développement du Territoire d'une part, et de l'Europe, par le biais des fonds Feder, d'autre part, pour la réalisation de cette carte numérique permet de mettre des licences d'utilisation gratuites à la disposition des organismes publics. La carte pourra ainsi alimenter leurs bases de données SIG (Systèmes d'Informations Géographiques).

### 10.6.21 (p) Le paléokarst quercynois : d'une ressource minérale à un projet de territoire

Thierry Pélissié<sup>1</sup>, Joseph Canérot<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET, Toulouse

Sur la bordure nord-orientale du bassin aquitain, les Causses du Quercy livrent de multiples remplissages karstiques. Certains d'entre eux ont été exploités vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle pour en extraire du phosphate et parfois du fer. Rapidement délaissées par les mineurs, ces « phosphatières » ont dès l'origine et encore de nos jours livré de riches faunes de vertébrés s'étalant sur plus de 30 millions d'années, depuis l'Yprésien jusqu'au Burdigalien. En milieu continental et sur une aire aussi restreinte, une telle situation est exceptionnelle et n'a guère d'équivalent que dans le Riversleigh australien. Abandonnés depuis plus d'un siècle, de par la variété des microclimats qui y règnent, ces sites sont devenus des oasis de biodiversité végétale.

Depuis les années 1990, « Les phosphatières du Quercy » et le Parc naturel régional des Causses du Quercy souhaitent protéger et valoriser ce patrimoine à la fois paléontologique, géomorphologique, ethno-archéologique et botanique. Après l'ouverture en 2000 du site du Cloup d'Aural aux visites touristiques et pédagogiques, un projet de Réserve géologique est en passe d'aboutir. Avec en ligne de mire une labellisation European geoparks, la mise en place d'itinéraires pédestres et de routes géotouristiques, la création d'une pièce de théâtre narrant l'exploitation minière, l'organisation de conférences et d'animations grand public contribuent à une diversification de l'offre culturelle et touristique ainsi qu'à une dynamisation économique du territoire.

## 10.7 Des Mathématiques aux simulations numériques pour les Géosciences

### Responsable :

- Hélène Barucq (MAGIQUE-3D, INRIA, Pau)  
helene.barucq@inria.fr

### Résumé :

Les Géosciences et les mathématiques appliquées font bon ménage. C'est d'autant plus vrai qu'aujourd'hui, les mathématiciens appliqués savent développer des méthodes de simulation avancées capables de résoudre des problèmes de plus en plus proches de la réalité. Les mathématiques appliquées interviennent à divers niveaux et l'objet de cette session est de donner un aperçu des activités des équipes Inria dans le domaine des mathématiques pour les Géosciences. Seront en particulier abordés les sujets suivants : assimilation de données, imagerie sismique, simulation de réservoirs, fluides géophysiques, transport de polluants, ingénierie mathématique côtière, sismologie.

### 10.7.1 (o) Simulation numérique Navier-Stokes de la génération de tsunami par glissement de terrain

Stéphane Abadie<sup>1</sup>, Denis Morichon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SIAME, Anglet

La génération de vagues par glissement de terrain est la deuxième cause de déclenchement de tsunamis. Elle est souvent consécutive à un séisme ou une éruption volcanique mais peut également se produire spontanément. Lorsque le glissement (ou l'avalanche de débris) est proche de la surface libre, partiellement émergé ou totalement émergé, l'interaction avec la surface libre est très forte et doit être modélisée correctement.

Dans ce travail, nous proposons d'étudier ce phénomène par un modèle Navier-Stokes VOF 1-fluide dans lequel eau, air et glissement sont des fluides Newtoniens. Pour simuler des glissements en bloc (i.e., rigide), nous utilisons l'approche des domaines fictifs avec une pénalisation sur la viscosité. Dans ce cadre, nous résolvons le couplage de manière implicite entre le glissement, l'eau et la surface libre environnante. Cette approche est dans un premier temps validée en comparaison de différentes études expérimentales.

La simulation des glissements granulaires déformables est bien plus délicate car il est difficile d'imposer une loi rhéologique réaliste. Nous montrerons néanmoins des simulations correspondant à une étude de cas réel (Cumbre Vieja, La Palma, Canaries) à partir d'une rhéologie simple Newtonienne. Les simulations Navier-Stokes 3D étant lourdes, un couplage avec un modèle Boussinesq a été réalisé dans ce travail. Nous terminerons la présentation par l'exposé des pistes que l'on peut envisager pour aller plus loin dans cette problématique des glissements granulaires.

### 10.7.2 (o) La géostatistique : un outil d'aide à la décision pour la décontamination et la reconquête des territoires radio-contaminés

Huong Liên Nguyen<sup>1,2</sup>, Christelle Courbet<sup>1</sup>, Caroline Simonucci<sup>1</sup>,  
Chantal De Fouquet<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'étude et de recherche sur les transferts et les interactions dans les sols, IRSN, Fontenay-aux-Roses

<sup>2</sup>Centre de Géosciences, École nationale supérieure des mines de Paris, Fontainebleau

Que ce soit à propos de l'accident nucléaire de Tchernobyl ou celui de Fukushima, la question de la décontamination et de la reconquête des territoires contaminés se pose. Il apparaît donc fondamental de pouvoir estimer rapidement et par des moyens fiables le stock de radionucléides présents sur ces territoires et susceptibles de contaminer les nappes sous-jacentes. L'étude de la tranchée T22 dans la zone d'exclusion de Tchernobyl et celle des données acquises suite à l'accident de Fukushima, montre l'efficacité et l'intérêt de la géostatistique dans cette problématique.

Dans le cas de Tchernobyl, il a été possible de remonter au stock de césium-137 disponible dans une tranchée (la T22) et d'estimer les incertitudes liées à la variabilité spatiale de ce paramètre. Tout d'abord, le volume de la tranchée est estimé à partir de profils géophysiques ayant permis une caractérisation du sous-sol. Après interpolation des limites de la tranchée et comparaison aux limites établies à partir des données d'activité en césium-137, les données brutes caractérisant l'intensité du rayonnement gamma dans les sols sont ensuite analysées en fonction de leur position dans la tranchée afin d'en réévaluer le volume, le stock en césium-137 en 1999 et les incertitudes associées.

Dans le cas de Fukushima, le croisement des données acquises par différentes méthodes et sur différents supports (campagnes aéroportées et

par voiture, balises, sondages, mesures d'activité sur des échantillons de sols, dosimétrie) met en évidence la nécessité d'une meilleure coordination entre les différentes campagnes de mesures. En particulier, on s'intéresse conjointement à la variabilité spatiale des dépôts en césium-137 et aux débits de dose associés.

Ce travail constitue une première étape en vue de l'intégration de la géostatistique dans une démarche raisonnée de décontamination des territoires visant à optimiser les volumes de sols à décontaminer.

### 10.7.3 (o) Accounting for correlated observation errors in image data assimilation

Vincent Chabot<sup>1</sup>, Maëlle Nodet<sup>1</sup>, Arthur Vidard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>MOISE, LJK, Grenoble

Satellite images can provide a lot of information on the earth system evolution. Although those sequences are frequently used, the importance of spatial error correlation are rarely taken into account in practice. This results in discarding a huge part of the information content of satellite image sequences. In this talk, we investigate a method based on wavelet or curvelet transforms to represent (at an affordable cost) some of the observation error correlation in a data assimilation context. We address the topic of monitoring the initial state of a system through the variational assimilation of images corrupted by a spatially correlated noise. The feasibility and the reliability of the approach is demonstrated in an academic context.

### 10.7.4 (o) Development of high order discontinuous finite-element methods for site effect assessment in realistic media

Nathalie Glinsky<sup>1</sup>, Stephane Lanteri<sup>2</sup>, Enrique Diego Mercerat<sup>3</sup>,  
Fabien Peyrusse<sup>4</sup>

<sup>1</sup>IFSTTAR/ CEREMA, INRIA Nachos, Nice

<sup>2</sup>INRIA NACHOS, Nice

<sup>3</sup>CEREMA, Nice

<sup>4</sup>IFSTTAR, INRIA Nachos, Nice

In few decades, numerical simulation in seismology has become an essential tool for ground motion assessment, thanks to the development of more accurate numerical methods, a better understanding of the physical models and a constant increase of the computational resources. In presence of strong topography or in sedimentary basins, one can observe site effects due to local geological and geotechnical conditions which cause a strong amplification and an increase in signal duration. This explains the importance of such studies especially for cities having a high density of population.

Several numerical techniques have been developed to solve the system of elastodynamic equations modeling seismic wave propagation. We concentrate on high-order discontinuous Galerkin (DG) finite-element methods for several reasons : i) They can easily deal with discontinuous coefficients and solutions for application to heterogeneous media, ii) They can handle unstructured meshes for an accurate discretization of complex geometries (topography and the geological structures of the medium), iii) The associated mass matrix is block diagonal and thus easily invertible, iv) The resulting solvers are naturally parallelizable.

In this talk, we will discuss about a DG method based on centered numerical flux and a leap-frog time discretization for the solution of the elastodynamic equations written in velocity-stress. This DG method is applied to wave propagation in realistic configurations especially the study of site effects in sedimentary basins and we present some recent improvements of our solver. We also illustrate, on few examples, the influence of the description of the geological structures of the medium as

well as the constitutive models on the ground motion computed at the basin surface.

### 10.7.5 (o) Models and numerical methods for geophysical flows. Application to sustainable energies

Jacques Sainte-Marie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Team ANGE, Inria, UPMC, CEREMA & CNRS

The modeling, the analysis and the simulation of geophysical flows are complex and challenging topics. The difficulties arising in gravity driven flow studies are threefold.

- The models and equations encountered in fluid mechanics (typically the free surface Navier-Stokes equations) are complex to analyze and solve.
- The considered phenomena often take place over large domains with very heterogeneous length scales (size of the domain, mean depth, wave length. . .) and different time periods e.g. coastal erosion, propagation of a tsunami, . . .
- Last but not least, these problems are multi-physics with strong couplings and nonlinearities.

During this presentation, we propose models approximating the free surface incompressible Euler equations and relaxing the classical shallow water assumptions. The smallness of dissipative effects in geophysical models which therefore generate singular solutions and instabilities reinforces the need of robust numerical methods. Even if the considered models do not strictly belong to the family of hyperbolic systems, they exhibit hyperbolic features and the analysis and discretization techniques we propose have connections with those used for hyperbolic conservation laws (e.g. kinetic description).

Several applications concerning hazardous flows and sustainable energies are given.

### 10.7.6 (o) Numerical schemes for the simulation of seismic wave propagation in frequency domain

Marie Bonasse-Gahot<sup>1</sup>, Henri Calandra<sup>2</sup>, Julien Diaz<sup>1</sup>, Stephane Lanteri<sup>3</sup>

<sup>1</sup>MAGIQUE-3D, INRIA Bordeaux Sud-Ouest, LMAP, Pau

<sup>2</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

<sup>3</sup>NACHOS, INRIA, JAD, Sophia Antipolis

Seismic imaging can be performed in the time domain or in the frequency domain regime. We focus here on the second setting. The drawback of time domain is that it requires storing the solution at each time step of the forward simulation. The difficulties related to frequency domain inversion lie in the solution of huge linear systems of equations, that often represents a challenging task today when considering realistic 3D elastic media, even with the progress of high-performance computational facilities. In this context, the goal of our study is to develop new forward solvers that reduce the number of degrees of freedom without hampering the accuracy of the numerical solution.

We consider here discontinuous Galerkin (DG) methods formulated on fully unstructured meshes, which are more convenient than finite difference methods on Cartesian grids to handle the topography of the subsurface. Moreover, DG methods are more adapted than continuous Galerkin (CG) methods to deal with hp-adaptivity. This last characteristic is crucial to adapt the mesh to the different regions of the subsurface, which is generally highly heterogeneous. Nevertheless, the main drawback of classical DG methods is that they are more expensive than classical CG methods, especially when arbitrarily high order interpolation of the field components is used, because they lead to large sparse linear systems with a higher number of globally coupled degrees of freedom as compared to CG methods on a given mesh.

In this work we consider a new class of DG method, the hybridizable DG (HDG) method (see (Kirby et al. 2012) for more details). Instead of solving a linear system involving the degrees of freedom of all volume cells of the mesh, the principle of HDG consists in introducing a Lagrange multiplier representing the trace of the numerical solution on each face of the mesh cells. Hence, it reduces the number of unknowns of the global linear systems and the volume solution is recovered thanks to a local computation on each element. HDG methods have been considered in some recent works, for example, for the solution of the elastodynamic equations in the time domain (Nguyen et al. 2011) and for Maxwell's equations in the frequency domain (Lanteri et al. 2013).

## Thème 11

# Forum Enseignement « Comprendre et Enseigner les Géosciences »

### 11.1 « Comprendre et Enseigner les Géosciences »

#### 11.1.1 (o) La mesure de la température terrestre : les enveloppes internes

Yanick Ricard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LGLTPE, Lyon

Depuis sa formation, la Terre dissipe sa chaleur initiale ainsi que celle liée à la décroissance d'éléments radioactifs. Cette dissipation entraîne des mouvements de convection de types très différents dans le manteau, le noyau ou la graine et se manifeste en surface par le flux géothermique. Je discuterai l'évolution de la température de notre planète depuis son accréation, et essaierai de présenter tout à la fois les grandes étapes de notre compréhension de la température et de la dynamique de ses couches internes ainsi que les idées les plus nouvelles qu'expérimentations, observations et simulations numériques nous suggèrent.

#### 11.1.2 (o) La mesure de la température terrestre : les enveloppes externes

Robert Delmas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université Paul Sabatier, Toulouse

La température de l'atmosphère est le paramètre auquel nous sommes le plus sensible, c'est donc la principale variable caractérisant le climat de la Terre, lequel est contrôlé, au premier ordre, par les échanges thermiques au sein des enveloppes fluides, l'océan et l'atmosphère. Si la température est la variable clé qui explique le fonctionnement de ces milieux elle n'est cependant pas indépendante des autres variables d'état : la pression et l'humidité dans l'atmosphère, la pression et la salinité dans l'océan. La température de surface sur les continents où les océans présente des variations spatiales et temporelles considérables et il est donc indispensable de la mesurer avec la meilleure précision possible sur toute la surface de la Terre. Cependant comprendre la météorologie, le fonctionnement de l'océan et, in fine le climat de la Terre, suppose que l'on mesure la température (et les autres variables d'état) sur toute l'épaisseur de ces milieux. A côté des mesures de température de surface, il s'agit donc de déployer des techniques de mesure permettant de déterminer les gradients verticaux de température à la fois dans

l'océan et dans l'atmosphère.

Après un rappel des principales implications de la température dans le fonctionnement des enveloppes externes de la Terre, nous détaillerons les principales méthodes de mesure de ce paramètre à la fois par des techniques in situ et par télédétection, incluant la télédétection spatiale. Par ailleurs le contexte actuel du changement climatique impose d'analyser de longues séries de mesures directes de température, dont il faut s'assurer de la cohérence (échelle du siècle) mais il impose aussi de reconstituer, par la mesure de paramètres indirectement liés à la température de l'océan et de l'atmosphère, les climats du passé jusqu'à des échelles géologiques.

**L'activité de terrain reste une activité fondamentale dans la formation des Sciences de la Terre. Cependant, l'organisation, le choix de la cible d'étude, les documents à donner, les comptes-rendus, tous ces aspects seront évoqués lors des trois interventions successives ; depuis l'université, le lycée et le collège.**

#### 11.1.3 (o) La pratique du terrain dans l'enseignement : l'expérience universitaire

Michel Corsini<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEOAZUR, Sophia Antipolis

#### 11.1.4 (o) La pratique du terrain dans l'enseignement : l'expérience du lycée

Marion Burgio<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lycée Louis Barthou, Pau, France

#### 11.1.5 (o) La pratique du terrain dans l'enseignement : l'expérience du collège

Jean-Noel Puig<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Collège Marguerite de Navarre, Pau

### 11.1.6 (p) Les KML (Keyhole Markup Language) un outil clef dans l'enseignement des Géosciences

Isabelle Veltz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lycée Roosevelt, Reims & Ifé Acces, ens-Lyon

Google Earth est un outil incontournable pour l'apprentissage des géosciences. Il permet d'ajouter à la dimension micro et macroscopique de la pétrographie faite en salle, celle de l'affleurement (notamment lorsqu'il n'est pas possible d'emmener les élèves sur le terrain) et celle du contexte géodynamique, paléoenvironnemental, paléomagnétique ....

L'utilisation des Kml offre aux élèves une approche 3D des cartes et permet d'y ajouter toutes les informations géolocalisées.

Les banques de Kml sont de plus en plus nombreuses et elles offrent des données que l'on peut associer à nos propres productions géolocalisées afin de réaliser des activités pratiques personnalisées en vue de diversifier nos pratiques pédagogiques.

### 11.1.7 (p) La Lithothèque-PACA

Nathalie Romeuf<sup>1</sup>, Christian Marcel<sup>2</sup>

sous la direction d'Alain Faralli - IA-IPR de SVT

<sup>1</sup>Professeur de SVT, Collège Les Hauts de l'Arc, Trets, Chargée de mission Centre de Formation à l'Enseignement de la Géologie (CeFEG), webmestre de la Lithothèque-PACA, académie d'Aix-Marseille

<sup>2</sup>Professeur de SVT, Lycée Jean Moulin, Draguignan, webmestre de la Lithothèque PACA, académie de Nice (christian.marcel@ac-nice.fr)

La Lithothèque PACA est un outil original de découverte en ligne des principaux sites géologiques de la région PACA à l'usage des professeurs de sciences de la vie et de la Terre et leurs élèves. Elle met à disposition un ensemble de données régionales de terrain à différentes échelles d'observation : paysage, affleurements, roches, éléments constitutifs (minéraux, fossiles ...), sous forme de photographies ou de courtes séquences vidéo, accompagnées d'informations géographiques précisant leur localisation et leur degré d'accessibilité. C'est une aide à la conception et à la réalisation de sorties géologiques sur le terrain et une mise à la disposition d'une documentation complémentaire pour étayer les démarches pédagogiques de classe dans la construction des principales notions et concepts géologiques et servir de supports à l'évaluation de leur acquisition par les élèves. La lithothèque objective également la mutualisation des données de terrain recueillies lors des stages et leur mise en perspective didactique. Elle inventorie les sites géologiques ayant un intérêt tant scientifique que pédagogique pour contribuer à leur préservation.

### 11.1.8 (p) Une Journée de terrain dans la Vallée d'Aspe

Aycaguer Pettan-Bertrand<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lycée du Pays de Soule. Rue Jean Monnet, 64130 Chéraute

Cette sortie est axée sur la compréhension de la présence d'hydrocarbures dans la région de Lacq en menant une étude des roches affleurant dans la vallée d'Aspe et en proposant aux élèves trois arrêts :

- 1er arrêt : étude des roches du jurassique et du crétacé (affleurements d'Escot) de l'échelle métrique à l'échelle centimétrique. Appréhension des notions de roche mère, roche réservoir, roche de couverture, paléoenvironnements, actualisme, subsidence...

- 2e arrêt : anticlinal du fort du Portalet (Urδος). Observation et schématisation d'un pli anticlinal dans des roches sédimentaires du primaire. Notion de piège pour hydrocarbures.

- 3e arrêt : panorama sur l'anticlinal de Sarrance. Observation et schématisation de l'anticlinal de Sarrance (échelle kilométrique) depuis un point de vue (après une balade de 1h).

La mise en commun des observations effectuées au cours des trois arrêts permet de comprendre les conditions ayant permis de piéger des hydrocarbures en profondeur au niveau de Lacq. Travail aussi sur la notion d'échelle en géologie (temps et espace).

### 11.1.9 (p) Sortie de terrain : La mémoire des mineurs de potasse d'Alsace

Christophe Le Gall<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lycée Jules Haag, Besançon

Dans le cadre des programmes 2011 de Première Scientifique, il est conseillé de présenter une ressource locale en relation avec la tectonique locale. La potasse alsacienne obéit à ces exigences. Sa formation contemporaine de l'effondrement du fossé rhénan permet d'évoquer avec les élèves les questions de tectonique ou encore de paléoclimatologie.

Mais c'est surtout l'occasion de rencontrer les bénévoles de l'association Kalivie (<http://kalivie.free.fr/>) qui font vivre la mémoire de l'exploitation industrielle de la potasse alsacienne. Une rencontre inoubliable avec un ancien mineur passionné qui fait vivre avec tout son cœur la mémoire de "ces formidables bonhommes" qu'étaient les mineurs de potasse.

### 11.1.10 (p) Olympiades Géosciences 2012 : Montagne Sainte Victoire

Jeffery Durand<sup>1</sup>, Antoine Durieux<sup>1</sup>, Benjamin Kassem<sup>2</sup>, Léo Mangeolle<sup>3</sup>, Carys Moller<sup>1</sup>, Guillaume Prevot<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Lycée International Valbonne

<sup>2</sup>Lycée Thiers Marseille

<sup>3</sup>Lycée Malraux Remiremont

<sup>4</sup>Lycée Français La Pérouse San Francisco

contact : Jean-Luc Berenguer, lycéens de Première S, membres de l'équipe de France aux Olympiades Internationales de Géosciences 2012

Chaque année, à travers des épreuves spécifiques, le dispositif 'Sciences à l'Ecole' sélectionne des élèves de classe de Première scientifique pour constituer une équipe chargée de représenter la France aux Olympiades Internationales de Géosciences (IESO). La France participe depuis 2011 à cette compétition amicale et ludique qui réunit de nombreux pays.

L'équipe de France est réunie chaque année, avant le grand départ pour les épreuves internationales, pour un stage de préparation intensive. Ces épreuves sont très exigeantes puisque portant sur un champ très vaste des géosciences : système solaire, océanographie, météorologie et géologie.

En 2012, les lycéens ont été réunis à Sophia Antipolis (06) pour une semaine de terrain, d'observation et de remise à niveau.

Dans le même temps, l'équipe devait composer un poster sur un objet géologique emblématique de leur pays. Autant dire que le choix est grand ... les élèves ont fini par s'intéresser à la montagne de la Sainte Victoire près d'Aix en Provence. Ce poster représenta donc la France aux IESO 2012 en Argentine, et fut remarqué par sa qualité graphique et son contenu scientifique.

### 11.1.11 (p) Les classes bilangues à thématique scientifique, un projet tout terrain !

Fabrice Mourau<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Collège Pierre de Coubertin BP 83085 Le Luc

Le collège Pierre de Coubertin, situé au Luc en Provence (Var), propose depuis la rentrée 2011 des classes bilangues à thématique scientifique (CBTS). Afin de préserver, d'attiser la curiosité et l'envie d'apprendre des élèves, l'équipe enseignante pratique une pédagogie basée sur le volontariat dans des pôles d'activités toujours en relation avec les sciences et déclinés en interdisciplinarité. Nous travaillons sur les méthodes (observation, utilisation d'outils de mesures, lecture de cartes, utilisation de graphiques, des TICE, création et utilisation de tableaux) tout en ancrant notre enseignement sur des exemples concrets en classe ou sur le terrain. L'environnement naturel de proximité est exploré, parfois avec l'aide de chercheurs qui participent aux activités. L'approche est interdisciplinaire.

Nos quatrièmes « géosciences » suivent depuis maintenant 3 ans un cursus axé sur l'étude de la Terre. Cette année, ils ont intégré un projet européen Comenius : « Let stones speak : rocking around our european heritage ». Ce programme d'échanges et de coopération entre établissements scolaires en Europe, implique 6 autres pays (Espagne, Italie, Slovaquie, Pologne, Lituanie et Islande). Ensemble, ils profitent de la richesse du patrimoine géologique Varois, partent également travailler sur le terrain à l'étranger et partagent leurs expériences avec nos partenaires afin de construire un parcours « géo-scientifique » qui va les accompagner pendant le temps du collège.

### 11.1.12 (p) Classes de terrain le long de la Route Géologique Transpyrénéenne

Marion Burgio<sup>1,2</sup>, Jean-Paul Richert<sup>1</sup>, Pierre Gruneisen<sup>1</sup>, Annie Lacazedieu<sup>1</sup>, Dominique Dekeyser<sup>3</sup>, Diego Vazquez-Prada<sup>4</sup>

<sup>1</sup>GéolVal, Pau

<sup>2</sup>Lycée Louis Barthou, Pau

<sup>3</sup>Ingénieur Géologue, TOTAL SA, Avenue Larribau, Pau

<sup>4</sup>Geoambiente asociacion, Espagne

Les associations GéolVal, Geoambiente et l'Université de Saragosse ont collaboré avec la fondation Total dans le cadre d'un projet européen de Route Géologique TransPyrénéenne [http://www.routetranspyreneenne.com/home\\_f.php](http://www.routetranspyreneenne.com/home_f.php). Cette production se décline en outils analogiques (panneaux de bords de route d'Oloron à Jaca puis Mallos de Riglos et livret-guide) et en outils numériques (projets de RGTP interactive sur G-Pad ou en classe), qui sont une richesse à exploiter pour nos classes de terrain. Il est possible de mixer une approche par la lecture de paysages depuis un site de bord de route à une randonnée géologique pour "toucher" les roches. Ce projet sert de base à une réflexion sur l'importance et la forme de la classe de terrain réellement utile aux élèves pour améliorer la compréhension des concepts-clés en géologie.

### 11.1.13 (p) Le Maroc, le royaume du jeune géoscientiste

Franck Bouttemy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lycée français Descartes - Rabat - Maroc

Le Maroc est un pays où sont implantés une trentaine d'établissements français, un des réseaux les plus denses au monde. Les élèves,

plus de 30 000, y suivent une scolarité suivant les programmes français de la maternelle jusqu'au baccalauréat. Toutefois les collègues cherchent à contextualiser localement l'enseignement à travers l'exploitation d'exemples marocains en tant que support de d'enseignement. La géologie du Maroc se prête particulièrement à cette démarche.

Une dynamique, sous différentes formes, s'est mise en place afin de développer et de structurer cette approche. Elle cherche à mutualiser les ressources de l'échelle des établissements à celle de l'ensemble de la zone. Au lycée Descartes de Rabat, des sorties de terrain sont organisées en géologie en cinquième (1/2 journée), première S (3 jours) et terminale S (2 jours); chacune sera illustrée par quelques sites remarquables avec comme exemple la vallée du Bou Regreg présentant des affleurements de marnes et de grès et l'exploitation des ressources : une briqueterie ; le plateau des volcans dans la région d'Azrou et une mine de plomb/argent à Mrirt ; le massif granitique de la région d'Oulmès avec une source d'eau chaude. Notre lycée est également équipé pour la réalisation de lame mince et dispose d'un sismomètre du réseau Sismos à L'école dans le cadre du dispositif des APP (action pédagogique pilote) Monde de l'AEFE. Enfin les élèves participent régulièrement au concours des olympiades de géosciences nationales et internationales. Différentes bases de données participent à la mutualisation des ressources et fournissent des pistes d'exploitation des ressources locales : - la Lithothèque du Maroc, un site Internet recensant les principaux géosites exploitables avec les élèves. - la station RABT, site de mise à disposition des données du sismomètre du lycée Descartes - le site SVT au Maroc, mutualise d'autres données et activités pratiques liées aux géosciences locales (données GPS, fichiers kmz, datations rubidium strontium, ...). Un environnement propice à la découverte et à l'exploitation pédagogique de la géodiversité marocaine.

### 11.1.14 (p) « SISMOS à l'Ecole » : La Terre mise sur écoute sismique ... dans les écoles

Jean-Luc Berenguer<sup>1,2</sup>, Julien Balestra<sup>1,3</sup>, Françoise Courboux<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GéoAzur, Sophia Antipolis

<sup>2</sup>Lycée International Valbonne Sophia Antipolis

<sup>3</sup>Sciences à l'Ecole

« SISMOS à l'Ecole » est un programme d'animation scientifique et technologique pour les collégiens et lycéens autour des géosciences et du risque sismique. Des collégiens et lycéens installent dans leur établissement un sismomètre, point de départ de nombreuses pistes d'activités pratiques autour en géosciences.

Il a pour objectif la promotion des sciences expérimentales et des nouvelles technologies à l'école, ainsi que le renforcement des liens avec les partenaires universitaires du monde de la recherche.

Ce programme vise également à développer le sens de l'autonomie et de la responsabilité chez les élèves, en leur faisant prendre conscience des problèmes liés aux risques naturels. Il est aujourd'hui déployé sur le territoire métropolitain et d'outre mer mais aussi sur plusieurs pays par le biais des lycées français à l'étranger.

Ce réseau sismologique à vocation éducative, initié dans les Alpes Maritimes, est piloté par le dispositif « Sciences à l'Ecole » et l'UMR Géoazur de Sophia Antipolis (CNRS, UNS, OCA, IRD). Aujourd'hui, le réseau d'une centaine d'équipes pédagogiques est impliqué dans des projets de science participative d'actualité comme les balises « Mermaid », la future mission « InSight » d'installation d'un sismomètre sur Mars...

### 11.1.15 (p) Adopt a mermaid @ school

Clément Astruc<sup>1</sup>, Eva Canamas<sup>1</sup>, Lucie Colin<sup>1</sup>, Emma Donati<sup>1</sup>, Melina Guinard<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Elèves du Lycée International de Valbonne Sophia Antipolis

Le projet de recherche 'Mermaid' consiste à un ensemble de balises parcourant, au gré des courants profonds, les océans. Chaque balise est munie d'un hydrophone et remonte périodiquement à la surface pour transmettre par satellite les données enregistrées. Ainsi se construit, en temps quasi réel, une base de données sur le bruit de l'océan.

Ce projet, piloté par l'UMR Géoazur de Sophia Antipolis, consiste à détecter principalement les ondes acoustiques générées par les vibrations du plancher océanique suite à la propagation d'ondes sismiques.

De l'étude du bruit de l'océan enregistré par les mermaids, de la position des balises lorsqu'elles remontent en surface et des données Argonautica du CNES, de nombreuses investigations sont possibles telles que : les courants profonds (direction et vitesse), le passage d'un cyclone, et aussi les ondes acoustiques dues aux séismes ...

Ce projet, mené avec les lycéens, constitue un programme de sciences participatives en collaboration avec les chercheurs à l'origine de ce projet. Les chercheurs mettent à disposition des lycéens les données parvenant des balises via les satellites ; les élèves étudient le bruit de l'océan et identifient divers phénomènes observables ... pour certains assez inédits !

Ces sirènes des temps modernes nous réservent bien des surprises.

### 11.1.16 (p) GLOBE

Jean Noel Puig<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Collège Marguerite de Navarre, 14 Boulevard Barbanegre, 64000 Pau

GLOBE est un programme international éducatif et scientifique qui réunit élèves, enseignants et scientifiques autour de l'observation et de la collecte de données environnementales. Les données recueillies sont partagées via une base de données accessible à tous.

Ce programme, qui a été initialisé en 1994 par Al Gore aux Etats-Unis et regroupe plus de 110 pays, a été rejoint par la France en 2004, suite à la signature d'un accord entre le Cnes et la Nasa.

La France est, pour le moment, engagée presque exclusivement sur la thématique atmosphère avec en particulier l'étude de l'impact des aérosols (ou particules) sur la qualité de l'air et le climat, en accompagnement du satellite franco-américain Calipso.

Les jeunes font régulièrement des mesures de leur environnement (température, pression...), mais ils sont aussi amenés à utiliser des instruments moins classiques, comme le photomètre solaire, qui leur permet de mesurer la quantité de particules (ou aérosols) contenues dans l'atmosphère. Les données provenant du réseau de classes sont partagées et croisées avec des données satellite pour réaliser des études sur la pollution de l'air, le climat...

Tous les ans, en début d'année, un séminaire réunit tous les acteurs scientifiques et éducatifs afin d'échanger expériences et résultats et de former les nouveaux arrivants et des Rencontres élèves ont lieu en fin d'année scolaire.

Cette année, pour marquer les 10 ans du projet, les Rencontres élèves se dérouleront dans les Pyrénées Orientales, un lieu emblématique de la qualité de l'air ! Les jeunes, en plus de la présentation des travaux réalisés pendant l'année scolaire, participeront à des mesures sur le terrain et à des rencontres avec des professionnels du Parc naturel régional des Pyrénées catalanes qui s'associe, cette année, à notre manifestation dans le cadre également de leur 10<sup>ème</sup> anniversaire [www.cnes.fr](http://www.cnes.fr) profil enseignants et médiateurs [www.globe.gouv](http://www.globe.gouv)

### 11.1.17 (p) Le programme des Sciences de la Terre en Collège et Lycée

Frédéric Blanc<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IA IPR SVT Rectorat de Bordeaux

### 11.1.18 (p) Using 3D Printers to Model Earth Surface Topography for Increased Student Understanding and Retention

David Thesenga<sup>1</sup>, James Town<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lake Forest Country Day School, Lake Forest, Illinois, Etats-Unis

<sup>2</sup>Triangle Coalition for STEM Education, Washington, DC, Etats-Unis

Understanding and appreciating the geographic terrain is a complex but necessary requirement for middle school aged (11-14yo) students. Abstract in nature, topographic maps and other 2D renderings of the Earth's surface and features do not address the inherent spatial challenges of a concrete-learner and traditional methods of teaching can at times exacerbate the problem. Technological solutions such as 3D-imaging in programs like Google Earth are effective but lack the tactile realness that can make a large difference in learning comprehension and retention for these young students.

This project attempted to streamline the process of transforming SRTM data from a GeoTIFF format by way of Python code. The resulting data was then inputted into a CAD-based program for visualization and exported as a .stl file for 3D printing. Combining methods of 2D paper representations, on-screen 3D visualizations, and 3D handheld models, give students the opportunity to truly grasp and retain the information being provided.

### 11.1.19 (a) L'IODP - ECORD vu par un professeur de sciences

Jean -Luc Berenguer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lycée International de Valbonne. Sophia Antipolis

Depuis 2009, les enseignants européens sont invités à se joindre à des expéditions IODP/ECORD en tant que « Teacher at sea » et de relayer le déroulement des expéditions de forages océaniques vers les écoles et le grand public.

C'est ainsi que j'ai découvert le programme « Éducation et sensibilisation » de l'IODP - ECORD à bord du JOIDES Resolution (Expédition IODP 345 - Hess Deep Plutonic Crust). Ces expéditions sont très utiles pour rester en contact avec la recherche et les chercheurs. Ce sont aussi des moments forts pour porter les géosciences dans la classe auprès des collégiens et lycéens.

« School of Rock » est également un moment important d'établir des relations dans la communauté éducative européenne. Il s'agit de séminaires réunissant une trentaine d'enseignants sur des sessions de formation gérée par des chercheurs : cycle de conférences, ateliers pratiques, travail de terrain ... Suite à différents séminaires, notamment en France, IODP - ECORD dispose à présent d'un réseau d'enseignants qui s'impliquent régulièrement dans l'intégration des ressources IODP/ECORD dans les écoles secondaires.

De nombreuses activités pratiques sont alors possibles à mettre en place dans les classes : répliques de carottes océaniques, bases de données des expéditions, visio conférences en direct des expéditions en cours ... De nombreuses classes ont bénéficié de ces opportunités dans leurs cours de sciences expérimentales.

### 11.1.20 (a) Cycle sismique

Agnès Mazza<sup>1</sup>, Jean Noel Puig<sup>1</sup>, Christian Aliaga<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Collège Marguerite de Navarre, Pau

La récurrence des séismes dans une même région et le long des mêmes systèmes de failles pose le problème de la périodicité des mouvements sismiques et de leur déclenchement. Ceci peut induire une idée fautive : "il est possible de prévoir des séismes". Nous avons cherché à construire un modèle qui reproduira ce qui se passe le long d'une faille. Les utilisations de ce modèle sont multiples et permettent d'aborder de nombreuses caractéristiques des séismes à plusieurs niveaux de compréhension.

Les élèves disposent pour cela d'un dispositif comportant un socle sur lequel sont collées des bandes abrasives de grains différents, un dispositif de poulies permet de faire cheminer linéairement des blocs de béton moulés sur ces bandes, un ressort de rigidité variable simule l'énergie accumulée dans la déformation. Ils disposent également d'un ordinateur avec le logiciel LOGGER pro 3, d'une web-cam et d'un capteur piézométrique. Le mode d'emploi du logiciel est également fourni. Un lot de ressorts permettant d'assurer la transmission entre les blocs et le système de traction. Le système de traction peut être manuel ou bien mécanique.

### 11.1.21 (a) Atelier SISMOS : Table vibrante

Jean -Luc Berenguer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lycée International de Valbonne. Sophia Antipolis

Comment représenter les effets d'un séisme sur le bâti ?

- Les élèves peuvent ainsi étudier le comportement du bâti de manière expérimentale (modélisation simplifiée).

- Conditions : Construire la maquette (modèle) de manière relativement simple, avec peu de matériel et un coût réduit.

Cette maquette peut-être réalisable aisément par les élèves de collège ou de seconde (enseignement d'exploration).

- Quelques exemples d'utilisations possibles :

- 5e : technologie « Habitat et ouvrage ».

- 4e : SVT « L'activité interne du globe »

- 2nde : enseignement d'exploration MPS et SL

### 11.1.22 (a) Atelier GLOBE CALISPh'air L'AE-ROATMOLUX

Aline Abadie<sup>1</sup>, Danielle de Straerke<sup>1</sup>, Jean Noel Puig<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Collège Marguerite de Navarre, Pau

Les aérosols influent sur la transparence atmosphérique en gênant la transmission lumineuse venue de l'espace. L'étude des poussières sensibilise les élèves aux modifications récentes de l'atmosphère.

Un groupe d'élève de collège s'est intéressé au travers du projet CALISPh'air aux données d'observation des satellites de l'a-train et aux mesures effectuées au sol sur l'état de l'atmosphère.

Nous nous sommes interrogées sur l'impact réel des aérosols sur la transmission des rayonnements. L'objectif est de déterminer l'influence de ces aérosols sur la lumière à partir d'un modèle analogique expérimental.

Nous avons construit un modèle expérimental constitué de tuyaux en PVC de 2 m de longueur et de 10 cm de diamètre, tout cela en circuit fermé. A une extrémité, nous fixons successivement différentes sources lumineuses (lampe halogène, des diodes à IR) devant lesquelles nous plaçons des filtres monochromatiques de couleurs différentes. Aux deux extrémités du tube principal, deux cellules photosensibles reliées à deux ordinateurs différents réalisent les mesures. Lorsque les aérosols sont envoyés (fumées d'encens, poussières volcaniques, ...) les mesures sont opérées par les cellules photosensibles. La quantité de lumière ayant traversé le nuage d'aérosols est donc évaluée. Le déplacement de ces aérosols le long des tuyaux est assuré par deux ventilateurs.

### 11.1.23 (a) Le capteur de Black Carbon

Aline Abadie<sup>1</sup>, Danielle de Straerke<sup>1</sup>, Jean Noel Puig<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Collège Marguerite de Navarre, Pau

Depuis plusieurs années, un groupe étudie les aérosols. Ils revêtent une importance de premier ordre dans la mesure où ils peuvent agir sur le climat car ils contribuent à la fonte des glaces ou à l'effet de serre et agissent sur la santé humaine (car les aérosols rentrent dans les alvéoles pulmonaires).

Les élèves s'interrogent sur la répartition annuelle des poussières à Pau et la façon de les mesurer et de les identifier. Ils mesurent la quantité d'aérosols au cours de l'année, des capteurs de poussières permettent d'évaluer cette présence dans les basses couches de l'atmosphère.

Après une première phase de prise en main du capteur, les élèves mesurent les poussières régulièrement. Ils récupèrent des poussières sur les filtres et recherchent au travers de procédure d'investigations qu'elles peuvent être les sources. Pour cela ils utilisent diverses sources de données dont les données satellites.

### 11.1.24 (a) Modélisation et mesures des convections et conductions thermiques

F. Masson<sup>1</sup>, F. Blanc<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Formateur académique Site de Formation du lycée de Graves  
<sup>2</sup>IA IPR SVT Rectorat de Bordeaux

Cet atelier propose de modéliser les phénomènes de conduction et de convection se déroulant au sein du globe afin de faciliter leur appréhension par les élèves. Il vise à mesurer ces phénomènes, les quantifier à diverses échelles de temps, et apporter un éclairage permettant de critiquer les modèles et résultats afin de faire des sciences.

### 11.1.25 (a) Using 3D Printers to Model Earth Surface Topography for Increased Student Understanding and Retention

David Thesenga<sup>1</sup>, James Town<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lake Forest Country Day School, Lake Forest, Illinois, Etats-Unis

<sup>2</sup>Triangle Coalition for STEM Education, Washington, DC, Etats-Unis

Atelier accompagnant le poster 11.1.18(p).



# Thème 12

## Forum des Métiers

### 12.1 « Forum des Métiers »

#### 12.1.1 Les grandes filières d'emploi : le monde académique

François Baudin<sup>1</sup>, Jean-François Deconinck<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ISTeP, Paris

<sup>2</sup>Biogéosciences, Dijon

Environ 2000 géologues au sens large travaillent en France dans des établissements publics. La grande majorité est embauchée dans les universités, les écoles normales supérieures, les écoles des mines, le muséum national d'histoire naturelle mais aussi au collège de France, au conservatoire national des arts et métiers, à l'école pratique des hautes études. D'autres sont rattachés à des établissements publics à caractère scientifique et technologique (EPCST) comme le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique), l'INRA (Institut National pour la Recherche Agronomique), l'IRD, (Institut de Recherche pour le Développement) ou le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

Des recherches couplant des aspects appliqués et académiques sont également menées par les nombreux géologues des établissements publics à caractères industriels et commercial (EPIC) tels que l'ANDRA (Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs), le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), le CEA (Commissariat à l'Energie atomique et aux énergies alternatives), l'IFPEN (Institut Français du pétrole et des énergies nouvelles), l'IFREMER, (Institut Français de Recherches pour l'exploitation de la Mer)...

- Comment devient-on chercheur ou enseignant-chercheur en France ?
- Quelles carrières peut-on espérer faire dans le monde académique ?
- Quels sont les salaires ?
- Quelles sont les perspectives d'embauche pour les années à venir ?

Voici les principales questions qui trouveront des réponses dans cette intervention.

#### 12.1.2 Les grandes filières d'emploi : le domaine industriel au sens large

Jean-Marc Montel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ENSG, Nancy

#### 12.1.3 Les métiers des Géosciences pétrolières

Sylvie Grimaud<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger, Pau

Le géoscientiste joue un rôle clé à des stades très stratégiques du processus pétrolier. Les nouvelles acquisitions de domaine minier, les forages de puits d'exploration ou les décisions de développer de nouveaux gisements sont tous associés à une prise de risque économique majeure. Or, ces décisions sont toujours basées sur des modèles de la subsurface établis par les géoscientistes, sur la base de leur connaissance géologique, et du traitement et de l'interprétation des données disponibles, qu'elles soient géologiques, géophysiques ou dynamiques.

Chez Total, les quatre métiers des géosciences sont la Géologie, la Géophysique, le Réservoir et la Géoinformation. Les deux métiers qui interviennent le plus en amont du processus sont la géologie et la géophysique. Géologues et géophysiciens sont au cœur de l'exploration et de la découverte de nouveaux gisements. Le métier Réservoir va s'intéresser surtout aux fluides et à leurs mécanismes de déplacement dans le réservoir. L'ingénieur de réservoir est le garant de l'estimation des réserves et des profils de production. Le métier Géoinformation est une spécificité de Total, liée à l'importance croissante prise en géosciences par le Data Management, le Logiciel et les Bases de Données. Il est demandé aux représentants de ces quatre métiers d'apporter chacun une connaissance forte des fondamentaux de leur métier, et en particulier un esprit toujours critique sur les données qui lui sont relatives. Il est aussi demandé aux géologues d'avoir une approche naturaliste basée sur une large expérience du terrain.

Néanmoins, il est clair que ces quatre métiers sont absolument complémentaires et qu'il s trouvent leur pleine valorisation dans le contexte d'études intégrées, impliquant aussi des métiers au-delà des géosciences, comme par exemple le forage ou l'architecture pétrolière.

#### 12.1.4 Le domaine minier

Johann Tuduri<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ENAG, l'école du BRGM, Orléans

La mine est un domaine très vaste et cette présentation se concentrera sur les métiers relevant des compétences du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), qui est l'établissement public français de référence dans les applications des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol. Dans le domaine des ressources minérales, le premier métier du BRGM est celui du géologue d'exploration. En effet, depuis sa création il y a plus de cinquante ans, le BRGM a découvert ou co-découvert plusieurs dizaines de gisements miniers qui ont été exploités et dont certains sont encore en cours d'exploitation. Mais au-delà de la découverte de nouvelles ressources et de leur exploitation, le géologue peut contribuer à d'autres aspects de la mine, tout au long de son cycle de vie. C'est le cas par exemple de la gestion des risques environnementaux durant la phase d'exploitation, du développement de procédés innovants pour le traitement de minerais primaires ou secondaires ou encore de la réhabilitation des anciennes exploitations (l'après-mine). Ces nouveaux métiers, dont certains sont apparus avec la prise de conscience des enjeux du développement durable, relèvent des sciences de la terre tout en revêtant un caractère très multidisciplinaire. Cette présentation fera un survol des différents métiers liés à la mine en faisant le lien entre le monde professionnel et les besoins de formation.

### 12.1.5 Le monde parapétrolier

Frédéric Pascaud<sup>1</sup>

<sup>1</sup> SPIE, Oil and Gas

### 12.1.6 Réponse opérationnelle pour la gestion du risque sismique et tsunami

Pascal Roudil<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CEA

La Terre est une planète tectoniquement active. Les séismes, et les tsunamis qu'ils peuvent générer, font partie des conséquences les plus courantes de cette activité avec des effets qui peuvent impacter la société de façon importante. Pour se protéger de ces effets, en plus d'essayer de comprendre ces phénomènes par la recherche, nous développons des systèmes d'alerte qui permettent d'informer rapidement les autorités et la population après un tremblement de terre et de les avertir d'une éventuelle approche d'un tsunami.

Dans le cas français, le CEA est en charge de l'alerte aux séismes en France et de l'alerte aux tsunamis en Polynésie Française (CPPT) et en Méditerranée Occidentale et Atlantique Nord-Est (CENALT). La construction et la maintenance en condition opérationnelle de ces systèmes d'alerte nécessite des compétences variées au niveau technique et scientifique, mais aussi des structures techniques et informatiques robustes.

L'alerte sismique en France Métropolitaine utilise une quarantaine de stations sismiques en France et se base sur un système d'astreinte à

la fois scientifique et technique. Les alertes sont diffusées entre autre vers la sécurité civile en moyenne dans la demi-heure qui suit le séisme.

L'alerte aux tsunamis, quant à elle, est gérée différemment selon le bassin surveillé. En Polynésie Française, les délais de propagation d'un tsunami depuis les différentes sources tsunamigènes varient de 3 à 10 heures et les populations, soumises régulièrement à l'aléa tsunami sont largement sensibilisées au risque.

Dans la Méditerranée Occidentale, en revanche, la durée de propagation d'un tsunami est courte, au plus 75 minutes, et l'alerte doit être diffusée vers la Sécurité Civile dans les 15 minutes qui suivent le séisme. Pour se faire les différents partenaires du CENALT (CEA, INSU et SHOM) mettent à disposition du Centre d'alerte des stations sismiques et marégraphiques qui permettent de détecter le tremblement de terre et le tsunami éventuellement généré. A ces moyens se rajoutent des stations de différents collaborateurs internationaux.

Tous ces systèmes d'alerte sont les premiers maillons des chaînes d'alerte qui se doivent être conçus en collaboration avec les différents acteurs de l'alerte montante et descendante et intégrer les populations pour ce qui est de la connaissance du risque et des gestes d'urgence à accomplir.

### 12.1.7 Concevoir un CV

Pierre Vinour<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CV- Associés

Le premier objectif du CV étant d'obtenir un entretien, il faut qu'il soit adapté au poste visé, clair et concis. La véracité et la cohérence des informations sont indispensables.

L'élaboration du CV comporte quatre étapes :

- Réflexion : identifier ses compétences (savoir-faire), ses qualités personnelles (savoir-être), ainsi que son parcours professionnel et extra-professionnel (associatif et autre).
- Sélection des informations pertinentes pour le poste visé.
- Mise en forme du CV
- Contrôle et vérification du CV (fautes, incohérences, compréhension).

Il existe deux façons de structurer un CV, soit par ordre chronologique (du plus récent au plus ancien), soit avec une vision thématique. Cette dernière version nécessite plus de recul mais permet un décryptage très rapide du profil.

La forme a également son importance : le CV doit donner envie d'être lu. Les recommandations de présentation relèvent essentiellement de la lisibilité du document : taille de police suffisante, structure aérée, présentation professionnelle. La présence de photo ainsi que la mention des références sont très discutables et doivent répondre à une demande explicite.

Le CV est souvent la clé d'entrée, celle qui permet d'établir un contact direct avec une entreprise. Construire un CV est une étape primordiale qu'il ne faut pas négliger.

# Conférences

## « Conférence plénière »

### Quelques enjeux de Géosciences pour l'exploitation des ressources énergétiques des deux prochaines décennies

Jean-François Minster<sup>1</sup>

<sup>1</sup> TOTAL, Paris-La Défense

*Jean-François Minster est diplômé de l'Ecole Polytechnique et docteur d'Etat de l'Institut de Physique du Globe de Paris.*

*En 1981 il crée le laboratoire de Physique et Chimie de l'Hydrosphère de l'Institut de Physique du Globe de Paris, puis le laboratoire d'Océanographie et de Géophysique de Toulouse qu'il dirige de 1985 à 1996. Il a travaillé à l'étude des météorites, du volcanisme terrestre, ainsi que des courants et du cycle océanique du carbone en relation avec le climat.*

*De 1990 à 1996, il occupe également la fonction de Directeur de l'Institut des Sciences de la Terre de Toulouse et prend, en 1996, la direction de l'Institut National des Sciences de l'Univers au CNRS.*

*De 2000 à 2005 Jean-François Minster est Président Directeur Général de l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER). En 2005 et 2006 il a été Directeur Scientifique Général du CNRS.*

*Il est membre correspondant de l'Académie des Sciences et membre de l'Académie des Technologies.*

*Le 1er octobre 2006, Jean-François Minster est nommé Directeur Scientifique de Total. La Direction Scientifique est rattachée à la Direction Générale.*

## « Conférence grand public »

### 2004 Indonésie, 2010 Chili, 2011 Japon : un bond dans la compréhension des méga-séismes et des tsunamis !

Serge Lallemand<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Géosciences Montpellier

La subduction joue un rôle majeur dans la dynamique terrestre au point qu'elle conditionne aujourd'hui très largement le mouvement des plaques tectoniques. La description puis l'analyse du processus d'enfoncement des plaques sur certaines de leurs bordures a donné lieu à un foisonnement d'observations et d'analyses qui se sont progressivement affinées depuis une cinquantaine d'années. Faute de me livrer à un état de l'art exhaustif sur les derniers résultats majeurs, je mettrai l'accent sur l'évolution de quelques concepts les plus largement en vogue allant de l'initiation du phénomène, en passant par son fonctionnement intime jusqu'aux catastrophes qui ont marqué la dernière décennie comme les séismes de Sumatra et du Japon par exemple.

*Serge Lallemand est directeur de recherche au CNRS à Montpellier. Il a consacré sa carrière à l'étude de la dynamique de la subduction en explorant d'abord la région la plus affectée par ces processus, c'est à dire l'ouest Pacifique et plus particulièrement l'Asie du Sud-Est, puis en modélisant certaines situations singulières comme la subduction de reliefs océaniques par exemple, et enfin en s'intéressant à la dynamique globale du système où manteau et lithosphère interagissent étroitement. Il a dirigé l'unité Géosciences Montpellier jusqu'en 2011 et fut lauréat de plusieurs prix dont la médaille d'argent du CNRS en 2013.*



# Liste des associations, laboratoires, écoles et organismes

- **AFK Association Française de Karstologie**  
France - France &  
DTER Centre-Est, DCAP, 38081 Isle d'Abeau, France - France
- **AIM Astrophysique Interactions Multi-échelles**  
CEA, Université Paris VII - Paris Diderot  
AIM - UMR 7158, Service d'astrophysique, CEA/Saclay, Orme des Merisiers F-91191 GIF SUR YVETTE CEDEX - France
- **ANDRA Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs**  
ANDRA Parc de la Croix Blanche rue Jean Monnet 92298 Chate-nay Malabry France - France
- **ASF Association des Sédimentologues Français**
- **Biogéosciences Biogéosciences**  
Université de Bourgogne, CNRS : UMR6282 6 Bvd Gabriel 21000 DIJON - France
- **BRGM Bureau de recherches géologiques et minières**  
3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans cedex 2 - France
- **Cedre Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux**  
715 rue Alain Colas, CS 41836, 29218 BREST CEDEX 2, France
- **CEFREM Centre de formation et de recherche sur l'environnement marin**  
INSU, CNRS : UMR5110, Université de Perpignan  
Bâtiment U 52 Av Paul Alduy 66860 PERPIGNAN CEDEX - France
- **CEREGE Centre européen de recherche et d'enseignement de géosciences de l'environnement**  
Aix Marseille Université, INSU, Institut de recherche pour le développement [IRD], CNRS : UMR7330  
15 Rue Notre Dame des Pauvres - BP 20 54501 VANDOEUVRE LES NANCY CEDEX - France
- **CEREMA Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement**  
Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie  
CEREMA - DTecEMF/DS 134 rue de Beauvais - CS 60039 60280 Margny Lès Compiègne - France  
&  
Laboratoire Régional de Nancy, 54510 Tomblaine, France - France  
&  
DTER Ouest, Département Villes et Territoires, 44000 Nantes,
- **Chrono-environnement Laboratoire Chrono-environnement**  
UMR 6249 Université de Franche-Comté  
Pôle Universitaire BP 71427 25211 Montbéliard cedex - France  
&  
UMR 6249 Université de Franche-Comté UFR Sciences et Techniques, 16 route de Gray, 25030 Besançon - France
- **CINaM Centre Interdisciplinaire de Nanoscience de Marseille**  
Aix Marseille Université, CNRS : UMR7325  
CINaM-CNRS Campus de Luminy Case 913 13288 Marseille Cedex 9 - France
- **CMAP Centre de Mathématiques Appliquées - Ecole Polytechnique**  
Polytechnique - X, CNRS : UMR7641  
CMAP UMR 7641 École Polytechnique CNRS Route de Saclay 91128 Palaiseau Cedex - France
- **CNFGG Comité National Français de Géodésie et de Géophysique**
- **CRCC Centre de Recherche pour la Conservation des Collections**  
CNRS : USR3224, Ministère de la Culture et de la Communication  
MNHN, CNRS, MCC, 36 rue Geoffroy Saint Hilaire, CP 21, 75005 Paris - France
- **CR2P Centre de recherche sur la Paléobiodiversité et les Paléoenvironnements**  
Université Pierre et Marie Curie (UPMC) - Paris VI, CNRS : UMR7207  
Tour 46-56 5ème, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05 - France
- **CRPG Centre de recherches pétrographiques et géochimiques**  
CNRS : UMR7358, INSU, Université de Lorraine  
Europôle Méditerranéen de l'Arbois - Avenue Louis Philibert - BP 80 - 13545 Aix-en-Provence cedex 4 - France
- **EcoLab Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement**  
CNRS : UMR5245, Observatoire Midi-Pyrénées, PRES Université de Toulouse, Université Paul Sabatier (UPS) - Toulouse III, Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT  
118 Route de Narbonne 31062 Toulouse - France

- **EDYTEM Environnements, Dynamiques et Territoires de Montagne**  
Université de Savoie, CNRS : UMR5204  
Université de Savoie, Campus Scientifique, Pôle Montagne 73376  
Le Bourget du Lac cedex - France
- **EEM-IPREM Equipe Environnement et Microbiologie-IPREM**  
CNRS : UMR5254  
Université de Pau et des Pays de l'Adour, bat IBEAS, 64000 Pau,  
France - France
- **EMMAH Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes**  
Institut national de la recherche agronomique (INRA) : UMR1114,  
Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse  
Université d'Avignon, 33 rue Louis Pasteur, F-84000 Avignon,  
France. - France
- **ENSEGID Ecole Nationale Supérieure en Environnement, Géoressources et Ingénierie du Développement durable**  
1 allée F. DAGUIN - 33600 Pessac - France
- **ENS LYON École normale supérieure de Lyon**  
École Normale Supérieure (ENS) - Lyon  
15 parvis René Descartes - BP 7000 69342 Lyon Cedex 07 -  
France
- **ENSG Ecole Nationale Supérieure Géologie**  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scien-  
tifique  
Rue du Doyen Marcel Roubault, BP40 54500 Vandoeuvre - France
- **ENSM-SE École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne**  
Groupe des Écoles des Mines (GEM)  
158, Cours Fauriel - 42023 Saint Étienne cedex 2 - France
- **EOSTS Ecole et Observatoire des sciences de la terre de Stras-  
bourg**  
université de Strasbourg, CNRS : UMS830, INSU  
5 Rue René Descartes 67084 STRASBOURG CEDEX - France
- **EPOC Environnements et Paléoenvironnements OCéaniques**  
CNRS : UMR5805, Université Sciences et Technologies - Bor-  
deaux I  
Avenue des Facultés - 33405 TALENCE CEDEX - France  
&  
CNRS : UMR5805, INSU, Observatoire Aquitain des Sciences de  
l'Univers, Université de Bordeaux (Bordeaux, France)  
Université de Bordeaux Avenue Geoffroy Saint-Hilaire 33615  
PESSAC Cedex - France
- **ESPACE Études des structures, des processus d'adaptation et  
des changements des espaces**  
CNRS : UMR7300, Aix Marseille Université, Université d'Avi-  
gnon et des Pays de Vaucluse, Université Nice Sophia Antipolis  
(UNS)  
ESPACE, Aix-Marseille Université - France
- **EVS Environnement, Ville, Société**  
UMR 5600 - Université de Lyon 2 -  
4Bis Rue de l'Université, 69007 Lyon - France
- **GEC Laboratoire Géosciences et Environnement**  
Université de Cergy Pontoise : EA4506  
Bâtiment E (Neuville 3.1), 4<sup>ème</sup> étage, - France
- **GEOAZUR Géoazur**  
Université Nice Sophia Antipolis (UNS), INSU, Observatoire de  
la Cote d'Azur, Institut de recherche pour le développement [IRD],  
CNRS : UMR7329  
Bât 1, 250 rue Albert Einstein Les Lucioles 1, Sophia Antipolis  
06560 VALBONNE - France
- **GEODE Géographie de l'environnement**  
CNRS : UMR5602, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II  
5 Allée Antonio Machado 31058 TOULOUSE CEDEX 1 - France
- **GEOLAB Laboratoire de Géographie physique et environne-  
mentale**  
Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, CNRS :  
UMR6042, Université de Limoges, Institut Sciences de l'Homme  
et de la Société  
Maison des Sciences de l'Homme UBP-CNRS 4, rue Ledru 63057  
CLERMONT FERRAND CEDEX 1 - France
- **GEOPS Géosciences Paris-Sud**  
CNRS : UMR8148, INSU, Université Paris XI - Paris Sud  
Dépt. des sciences de la terre Bâtiments 504 & 509 91405 ORSAY  
CEDEX - France
- **GeoRessources GéoRessources**  
UMR 7359 - Université de Lorraine - CNRS - CREGU  
ENSG, 2 rue du doyen Marcel Roubault, TSA 70605, 54518  
Vandoeuvre-Lès-Nancy Cedex, France - France
- **GEORESSOURCES ET ENVIRONNEMENT Géoressources  
et environnement**  
Université Michel de Montaigne - Bordeaux III : EA4592  
Institut EGID 3 1, allée Daguin F-33607 Pessac cedex - France
- **GEOSCIENCES Centre de Géosciences**  
MINES ParisTech - École nationale supérieure des mines de Paris  
35 rue Saint-Honoré 77305 Fontainebleau cedex - France
- **IAH Karst commission IAH Commission on Karst Hydrogeo-  
logy**
- **Géosciences Marines Géosciences Marines**  
Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer  
(IFREMER)  
Z.I. Pointe du Diable, BP 70, 29280 Plouzané - France
- **GET Géosciences Environnement Toulouse**  
Observatoire Midi-Pyrénées, Institut de recherche pour le déve-  
loppement [IRD] : UMR239, Université Paul Sabatier [UPS] -  
Toulouse III, CNRS : UMR5563, Université Paul Sabatier (UPS)  
- Toulouse III  
Observatoire Midi-Pyrénées 14 Avenue Edouard Belin 31400 Tou-  
louse - France
- **GFA Groupe Français des Argiles**
- **GMGL Géosciences Marines et Géomorphologie du Littoral**  
UMR 6538 DO-GMGL, IUEM  
Géosciences Marines et Géomorphologie du Littoral, Université  
de Bretagne-Sud  
Campus de Tohannic, BP 573, 56017 Vannes cedex - France

- **GM Géosciences Montpellier**  
CNRS : UMR5243, Université Montpellier II - Sciences et techniques  
Place E. Bataillon - CC 60 34095 MONTPELLIER CEDEX 5 - France
- **GR Géosciences Rennes**  
Université de Rennes 1, Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes, INSU, CNRS : UMR6118  
Bâtiment 15 - Université de Rennes 1 - Campus de Beaulieu - CS 74205 - 35042 Rennes Cedex - France - France
- **Géosystèmes Laboratoire Géosystèmes**  
Université Lille 1, Sciences et Technologies - Lille 1 (FRANCE)  
Bâtiment SN5, Avenue Paul Langevin, 59655 VILLENEUVE D'ASCQ Cedex - France
- **HNHP Histoire Naturelle de l'Homme Préhistorique**  
UMR 7194 - Université de Perpignan - Via Domitia  
52 avenue Paul Alduy - 66860 Perpignan Cedex 9 - France
- **HSM Hydrosociences Montpellier**  
CNRS : UMR5569, Institut de recherche pour le développement [IRD], Université Montpellier II - Sciences et techniques  
Univ. Montpellier II - Case MSE Place Eugène Bataillon 34095 MONTPELLIER CEDEX 5 - France
- **ICJ Institut Camille Jordan**  
Institut National des Sciences Appliquées [INSA], Ecole Centrale de Lyon, Université Claude Bernard - Lyon I, CNRS : UMR5208, Université Jean Monnet - Saint-Etienne  
Bât. Jean Braconnier n° 101 43 Bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE CEDEX - France
- **ICGM Institut Charles Gerhardt Montpellier**  
CNRS : UMR5253  
Université Montpellier 2 - Place E. Bataillon - CC1505 - Bât. 15 - 34095 Montpellier Cedex 05 - France
- **IC2MP INSTITUT DE CHIMIE DES MILIEUX ET MATERIAUX DE POITIERS**  
Université de Poitiers, CNRS : UMR7285 4 RUE MICHEL BRUNET BAT B27 - CHIMIE 86022 POITIERS CEDEX - France
- **ICSM Institut de Chimie Séparative de Marcoule**  
CEA, CNRS : UMR5257, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier, Université Montpellier II - Sciences et techniques  
30207 BAGNOLS SUR CEZE CEDEX - France
- **IDES Interactions et dynamique des environnements de surface**  
CNRS : UMR8148, INSU, Université Paris XI - Paris Sud  
Dépt. des sciences de la terre Bâtiments 504 & 509 91405 ORSAY CEDEX - France
- **IDEES Identité et Différenciation des Espaces, de l'Environnement et des Sociétés**  
UMR6266 IDEES Université de ROUEN  
Bâtiment IRED 7 Rue Thomas Becket 76821 MONT SAINT AIGNAN FRANCE
- **IFPEN Institut Français du Pétrole Energies Nouvelles**  
1&4, avenue de Bois Préau, 92 500 Rueil-Malmaison, France - France
- **IFREMER Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer**  
Technopôle Brest Iroise - BP 70 - 29280 Plouzané - France
- **IFSTTAR Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux**  
IFSTTAR  
BP 4129, route de Bouaye, 44332 Bouguenais - France
- **IMBE Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale**  
Aix Marseille Université  
Technopôle de l'Environnement Arbois-Méditerranée Domaine du Petit Arbois Avenue Louis Philibert 13545 Aix en Provence Cedex 04 - France
- **IMFT Institut de mécanique des fluides de Toulouse**  
CNRS : UMR5502, Université Paul Sabatier (UPS) - Toulouse III, Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT  
Allée Camille Soula, F-31400 Toulouse - France
- **INERIS Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques**  
Parc technologique ALATA, 5 rue Jacques Taffanel, BP 2, 60 550 Verneuil-en-Halatte - France
- **Institut Néel Institut Néel**  
CNRS : UPR2940, Université Joseph Fourier - Grenoble I  
25 rue des Martyrs 38042 Grenoble - France
- **INSU Institut National des Sciences de l'Univers**  
INSU-CNRS, Paris
- **IPGP Institut de Physique du Globe de Paris**  
Université Paris VII - Paris Diderot, IPG PARIS, INSU, CNRS : UMR7154  
IPGP, 1 rue Jussieu, 75238 Paris cedex 05 ; Université Paris Diderot, Bât. Lamarck A case postale 7011, 75205 Paris CEDEX 13 - France
- **IPGS Institut de physique du globe de Strasbourg**  
université de Strasbourg, INSU  
5 Rue René Descartes 67084 STRASBOURG CEDEX - France
- **IPRA Institut pluridisciplinaire de recherche appliquée dans le domaine du génie pétrolier**  
CNRS : FR2952, Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA]  
Av. de l'université - 1155 64013 PAU CEDEX - France
- **IRAP Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie**  
CNRS : UMR5277, Université de Toulouse Paul Sabatier  
Observatoire Midi-Pyrénées, 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse - France
- **IRSN Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire**  
Ministère de l'écologie de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, Ministère de la santé, Ministère de la Défense, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, Ministère de l'économie, de l'industrie et de l'emploi  
BP17 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex - France
- **ISEM Institut des Sciences de l'Evolution**  
CNRS : UMR5524

- Université Montpellier 2, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5, France - France
- **ISTeP Institut des Sciences de la Terre de Paris**  
Université Pierre et Marie Curie (UPMC) - Paris VI, CNRS : UMR7193  
4, place Jussieu BP CC129 75252 PARIS CEDEX 05 - France
  - **ISTerre Institut des sciences de la Terre**  
CNRS : UMR5275, IFSTTAR, IFSTTAR-GERS, Université de Savoie, Université Joseph Fourier - Grenoble I, INSU, OSUG, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR219, PRES Université de Grenoble BP 53 38041 Grenoble cedex 9 - France &  
Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR219, Université de Savoie, CNRS : UMR5275  
Le bourget le lac - France
  - **ISTO Institut des Sciences de la Terre d'Orléans**  
Université d'Orléans, CNRS : UMR7327, INSU, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)  
Campus Géosciences 1A, rue de la Férollerie 45071 Orléans cedex 2 - France
  - **IUEM Institut Universitaire Européen de la Mer**  
CNRS : FR2195, Université de Bretagne Occidentale (UBO)  
Technopôle Brest-Iroise, Place Copernic, 29280 Plouzané - France
  - **LAB Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux**  
CNRS : UMR5804, INSU, Université Sciences et Technologies - Bordeaux I  
2 rue de l'Observatoire B.P. 89 33270 FLOIRAC - France
  - **LAMS Laboratoire d'Archéologie Moléculaire et Structurale**  
Université Pierre et Marie Curie [UPMC] - Paris VI, UMR-CNRS 8220  
Paris - France
  - **LARGE Laboratoire de Recherche en Géosciences et Energies**  
Université des Antilles et de la Guyane EA4098  
Saint-Claude, Guadeloupe - France
  - **Lasalle Beauvais Institut Polytechnique LaSalle Beauvais**  
Rue Pierre WAGUET - BP 30313 F-60026 BEAUVAIS Cedex - France
  - **LATEP LABORATOIRE DE THERMIQUE ENERGÉTIQUE ET PROCÉDES (EA1932)**  
Université de Pau et des Pays de l'Adour BP 1155 64013 PAU - France
  - **LAVUE Laboratoire Architecture Ville Urbanisme Environnement**  
UMR7218 CNRS, Ecole Nationale Supérieure d'architecture Paris-Val de Seine  
3-15 Quai Panhard et Levassor, 75013 Paris. Tel : +33(0)172696370 ; Fax : +33(0)172696382 - France
  - **LCABIE-IPREM Laboratoire de Chimie Analytique Bio-Inorganique et Environnement-IPREM**  
CNRS : UMR5254, Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA]  
Hélioparc Pau Pyrénées, 2 avenue du Président Angot, F-64053 PAU Cedex 9 - France
  - **LGCgE Laboratoire de Génie Civil et Géo-Environnement**  
Lille
  - **LDO Laboratoire Domaines Océaniques**  
Université de Bretagne Occidentale (UBO), Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), Institut d'écologie et environnement, INSU, Observatoire des Sciences de l'Univers, CNRS : UMR6538  
Technopôle Brest-Iroise, Place Copernic, 29280 Plouzané - France
  - **DASE/LDG Laboratoire de Détection et de Géophysique**  
Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon Cedex - France
  - **LDO Laboratoire Domaines Océaniques**  
Université de Bretagne Occidentale (UBO), Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), Institut d'écologie et environnement, INSU, Observatoire des Sciences de l'Univers, CNRS : UMR6538  
Technopôle Brest-Iroise, Place Copernic, 29280 Plouzané - France
  - **LECOB Laboratoire d'Ecogéochimie des environnements benthiques**  
CNRS : UMR8222, Université Pierre et Marie Curie (UPMC) - Paris VI  
Avenue de Fontaulé 66650 Banyuls sur Mer - France
  - **LEGOS Laboratoire d'études en Géophysique et océanographie spatiales**  
CNRS : UMR5566, Institut de recherche pour le développement [IRD], CNES, Observatoire Midi-Pyrénées, INSU, Université Paul Sabatier (UPS) - Toulouse III  
14 avenue Edouard Belin 31400 Toulouse - France
  - **LEHNA Laboratoire d'Écologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés**  
Université Claude Bernard - Lyon I, ISARA-Lyon, École Nationale des Travaux Publics de l'État [ENTPE], CNRS : UMR5023  
Université de Lyon, 69622 Villeurbanne Cedex - France
  - **LEMETA Laboratoire d'énergétique et de mécanique théorique et appliquée**  
CNRS : UMR7563, Université de Lorraine  
ENSEM - 2 Avenue de la Forêt de Haye TSA 60604 54518 Vandoeuvre-lès-Nancy cedex - France
  - **LERCM Laboratoire d'étude radioécologique du milieu continental et marin**  
Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) IRSN/PRP-ENV/SESURE/Laboratoire d'études radioécologiques en milieu continental et marin BP 1 13108 Saint Paul Lez Durance Cedex, France - France
  - **LETG Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique**  
Université de Caen Basse-Normandie, Université de Nantes, Université de Bretagne Occidentale [UBO], CNRS : UMR6554, Université de Rennes II - Haute Bretagne, Université d'Angers, Université de Bretagne Occidentale (UBO)  
Faculté des Lettres BP 81227 44312 NANTES Cédex 3 - France
  - **LFC-R Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs**  
Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA], CNRS : UMR5150, TOTAL  
BP 1155 - 64013 Pau - France
  - **LGCGE Laboratoire Génie Civil et Géo-Environnement**  
IGroupe ISA, Université Lille I - Sciences et technologies, Univer-

- sité d'Artois, HEI, École Nationale Supérieure des Mines - Douai  
Bâtiment SN5, Avenue Paul Langevin, F-59655 Villeneuve  
d'Ascq - France
- **LGE Laboratoire de géologie de l'ENS**  
INSU, CNRS : UMR8538, École normale supérieure [ENS] - Paris  
24 Rue Lhomond 75231 PARIS CEDEX 05 - France
  - **LGLTPE Laboratoire de Géologie de Lyon - Terre, Planètes,  
Environnement**  
CNRS : UMR5276, INSU, Université Claude Bernard - Lyon I,  
École Normale Supérieure (ENS) - Lyon  
Université Claude Bernard Lyon 1. UMR CNRS 5276 LGLTPE  
Bâtiment Géode 2, rue R. Dubois 69100 Villeurbanne - France
  - **LGP Laboratoire de géographie physique**  
CNRS : UMR8591, Université Paris I - Panthéon-Sorbonne, Uni-  
versité Paris-Est Créteil Val-de-Marne (UPEC)  
bat. Y 1 Place Aristide Briand 92195 MEUDON CEDEX - France
  - **LGSR Laboratoire Géosciences Réunion**  
CNRS : UMR7154, Université de la Réunion Faculté des Sciences  
et techniques - Université de La Réunion 15 avenue René Cassin  
CS92003 97744 SAINT DENIS CEDEX 9 - France
  - **LHYGES Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de  
Strasbourg**  
CNRS-ENGEEES-Uds  
UMR 7517 CNRS EOST / Uds 1, rue Blessig 67084 STRAS-  
BOURG Cedex - France
  - **LIEC Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements  
Continentaux**  
CNRS : UMR7360, Université de Lorraine  
15 Avenue du Charmois, 54500 VANDOEUVRE-LES-NANCY -  
France
  - **LIENSs Littoral ENvironnement et Sociétés**  
CNRS : UMR7266, Université de La Rochelle  
Bâtiment Marie Curie Avenue Michel Crépeau 17 042 La Ro-  
chelle cx1 - Bâtiment ILE 2, rue Olympe de Gouges 17 000 La  
Rochelle - France
  - **LISA Laboratoire inter-universitaire des systèmes atmosphé-  
riques**  
CNRS : UMR7583, INSU, Université Paris VII - Paris Diderot,  
Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne (UPEC)  
61 Av du général de Gaulle 94010 CRETEIL CEDEX - France
  - **LMAP Laboratoire de Mathématiques et de leurs Applica-  
tions de Pau**  
Université de Pau et des Pays de l'Adour  
UMR CNRS 5142 - France
  - **LMMNHN Laboratoire de Cosmochimie et de Minéralogie du  
Muséum National d'Histoire Naturelle**  
CNRS : FRE2456  
61, rue Buffon 75005 PARIS - France
  - **LM2E Laboratoire de microbiologie des environnements ex-  
trêmophiles**  
Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer  
(IFREMER),  
CNRS : UMR6197, Université de Bretagne Occidentale (UBO),  
Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM)
  - Centre de Brest DRV/VP - BP 70 29280 PLOUZANE - France
  - **LMS Laboratoire de mécanique des solides**  
CNRS : UMR7649, Polytechnique - X, MINES ParisTech - École  
nationale supérieure des mines de Paris  
Route de Saclay 91128 PALAISEAU CEDEX - France
  - **LMV Laboratoire Magmas et Volcans**  
Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, INSU, Institut de  
recherche pour le développement [IRD], CNRS : UMR6524, Uni-  
versité Jean Monnet - Saint-Etienne  
5 Rue Kessler 63038 CLERMONT FERRAND CEDEX 1 - France &  
INSU, CNRS : UMR6524, Université Jean Monnet - Saint-Etienne  
23 rue Dr Paul Michelon 42023 Saint-Etienne - France
  - **LOCEAN Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expé-  
rimentations et Approches Numériques**  
Université Pierre et Marie Curie (UPMC) - Paris VI, CNRS :  
UMR7159, INSU, Institut de recherche pour le développement  
[IRD],  
Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN)  
case 100 4 place Jussieu 75252 PARIS CEDEX 05 - France
  - **LOG Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences**  
UMR 8187 CNRS, Université du Littoral Côte d'Opale 32 Avenue  
Foch, 62930 Wimereux - France
  - **LOMC Laboratoire Ondes et Milieux Complexes**  
UMR 6294 CNRS, Université du Havre, 53 rue de Prony BP540,  
76056 Le Havre cedex - France
  - **LPGN Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de  
Nantes**  
CNRS : UMR6112, INSU, Université de Nantes  
2 Rue de la Houssinière - BP 92208 44322 NANTES CEDEX 3 -  
France
  - **LSBB Laboratoire Souterrain à Bas Bruit**  
Université Nice Sophia Antipolis (UNS), CNRS : UMS3528, Ob-  
servatoire de la Cote d'Azur  
La Grande Combe 84400 Rustrel - France
  - **LSCE Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environne-  
ment**  
Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ),  
CEA, CNRS : UMR8212  
LSCE-CEA-Orme des Merisiers (point courrier 129) F-91191  
GIF-SUR-YVETTE CEDEX LSCE-Vallée Bât. 12, avenue de la  
Terrasse, F-91198 GIF-SUR-YVETTE CEDEX - France
  - **LTHE Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et en-  
vironnement**  
Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Université  
Joseph Fourier - Grenoble I, INSU, OSUG, CNRS : UMR5564,  
Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR012  
ENSHMG - Domaine Universitaire 1023-1025 Rue de la piscine -  
BP 53 38041 GRENOBLE CEDEX 9 - France
  - **M2C Morphodynamique continentale et côtière**  
CNRS : UMR6143, INSU, Université de Caen Basse-Normandie,  
Université de Rouen  
24 Rue des tilleuls 14000 CAEN - France
  - **METIS Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions  
dans les hydrosystèmes et les Sols**

- École Pratique des Hautes Études [EPHE], CNRS : UMR7619, Université Pierre et Marie Curie (UPMC) - Paris VI  
UPMC, Case courrier 105, 4 place Jussieu, 75005 Paris - France
- **MIO Institut méditerranéen d'océanologie**  
CNRS : UMR7294, Université du Sud Toulon - Var, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UMR235, Aix Marseille Université  
M.I.O. Institut Méditerranéen d'Océanologie Campus de Luminy  
Case 901 13288 MARSEILLE cedex 09 - France  
&  
CNRS : UMR110, Aix Marseille Université, Université de Toulon, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UMR110  
Université de Toulon, Aix-Marseille Université, CNRS/INSU, IRD, MIO, UM 110, 83957, La Garde Cedex, France - France
  - **MNHN Muséum national d'histoire naturelle**  
Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN)  
57, rue Cuvier - 75231 Paris Cedex 05 - France
  - **MONARIS de la Molécule aux Nano-objets : Réactivité, Interactions et Spectroscopies**  
Université Pierre et Marie Curie (UPMC) - Paris VI, CNRS : UMR8233 Sorbonne Universités, UPMC Université Paris 6 - France
  - **NAVIER Laboratoire Navier**  
FSTTAR, CNRS : UMR8205, École des Ponts ParisTech (ENPC), Université Paris Est (UPE)  
Ecole des Ponts ParisTech 6 / 8 avenue Blaise Pascal 77455 CHAMPS SUR MARNE - France
  - **PACEA De la Préhistoire à l'Actuel : Culture, Environnement, Anthropologie**  
Université de Bordeaux (Bordeaux, France), CNRS : UMR5199, Ministère de la Culture et de la Communication  
UMR 5199 PACEA Université de Bordeaux Bâtiment B8 Allée Geoffroy Saint Hilaire CS 50023 33615 PESSAC CEDEX - France
  - **PHENIX PHysicochimie des Electrolytes et Nanosystèmes Interfaciaux**  
ESPCI ParisTech, CNRS : UMR8234, Université Pierre et Marie Curie (UPMC) - Paris VI  
Université Pierre et Marie Curie, Case Courrier 51 4 place Jussieu - 75222 Paris Cedex 5, FRANCE - France
  - **PPMD Laboratoire de Physico-Chimie des Polymères et des Milieux Dispersés**  
CNRS : UMR7615, Université Pierre et Marie Curie (UPMC) - Paris VI, ESPCI ParisTech  
10, Rue Vauquelin 75231 Paris Cédex 05 - France
  - **PROMES Procédés et Matériaux Solaires**  
CNRS : UPR8521  
Rambla de la Thermodynamique. Tecnosud. 66100 Perpignan - France
  - **SEDI Study of the Earth's Deep Interior**
  - **SET Société, environnement, territoire**  
CNRS : UMR5603, Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA] Av de l'université 64000 PAU - France
  - **SGF Société Géologique de France**
  - **SFIS Société Française des Isotopes**
  - **SFMC Société Française de Minéralogie et de Cristallographie**
  - **SHOM Service Hydrographique et Océanographique de la Marine**  
13 rue du Chatellier 29200 BREST - France
  - **SIAME SIAME**  
EA4581 SIAME  
Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA]  
Allée du parc Montaury 64600 Anglet - France
  - **SISYPHE Structure et fonctionnement des systèmes hydriques continentaux**  
CNRS UMR 7619 Université Pierre et Marie Curie - Paris 6 4 Place Jussieu, 75005 Paris - France
  - **SPCTS Science des Procédés Céramiques et de Traitements de Surface**  
CNRS : UMR7315, Institut des Procédés Appliqués aux Matériaux, Ecole Nationale Supérieure de Céramique Industrielle, Université de Limoges  
SPCTS, Centre Européen de la Céramique, 12 Rue Atlantis, 87068 LIMOGES CEDEX - France
  - **3S-R Laboratoire sols, solides, structures - risques**  
Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, CNRS : UMR5521,  
Université Joseph Fourier - Grenoble I, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG)
  - **TRACES Travaux et Recherches Archéologiques sur les Cultures, les Espaces et les Sociétés**  
Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, CNRS : UMR5608  
TRACES, Université de Toulouse, CNRS, 5 allées Antonio Machado 31058 Toulouse, France. - France
  - **UMET Unité Matériaux et Transformations**  
CNRS : UMR8207, Université des Sciences et Technologies de Lille - Lille I  
Villeneuve d'Ascq - France
  - **UPMC Université Pierre et Marie Curie**  
Université Pierre et Marie Curie [UPMC] - Paris VI, Université Pierre et Marie Curie (UPMC) - Paris VI  
4 place Jussieu - 75005 Paris - France
  - **UPPA Université de Pau et des Pays de l'Adour**  
Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA]  
Avenue de l'Université - BP 576 - 64012 Pau Cedex - France

# Index des auteurs

## Index

- A**
- Ababou, R., 454  
 Abadie, A., 509  
 Abadie, S., 24, 109, 110, 112, 503  
 Abbas, K., 50  
 Abdessadok, S., 271  
 Abdulhameed, S., 201  
 Abella, J., 424  
 Abessolo, G., 112  
 Abidi, R., 356  
 Abily, B., 131  
 Aboumaria, K., 11, 113  
 Aboussou, A., 91  
 Abtout, A., 29, 489  
 Acha, D., 426  
 Achalhi, M., 80  
 Achek-Youcef, M., 47  
 Adam S., 348  
 Adam, P., 117, 281  
 Adatte, T., 248  
 Adelise, F., 327, 329, 330  
 Ader, M., 116, 252, 253, 448  
 Adje, C., 112  
 Admou, H., 131, 376  
 Adoum, I., 32  
 Aebischer, S., 433  
 Aertgeerts, G., 129  
 Afacan Ergün, T., 35  
 Afalfiz, A., 369  
 Affouri, H., 279  
 Afilhado, A., 149, 151, 154–157  
 Afonso, L., 156  
 Agard, P., 168, 174, 483  
 Agoudjil, A., 149  
 Agranier, A., 147  
 Agrinier, P., 146, 286, 327, 448  
 Aguilar C., 181, 186  
 Aguilar, G., 14, 15, 19, 167  
 Ahadi, F., 16  
 Ahlberg, P., 481  
 Ahmadine, A., 156  
 Ahmed, A., 157, 287  
 Ahmed, H., 156  
 Aiello, I., 105  
 Aïfa, T., 358  
 Aïssa, P., 421  
 Ait-Addi, A., 64, 66, 260  
 Ait-Hamouh, F., 131  
 Ait-Itto, F., 64, 66  
 Akköprü, E., 346  
 Aktouf A., 326, 329  
 Al Ganad, I., 157  
 Al Heib, M., 41  
 Al-Abdala, A., 8, 10  
 Al-Sid-Cheikh, M., 404, 411  
 Alansari, A., 358, 370, 378  
 Alard, O., 130  
 Alboresha, R., 41  
 Albrecht, A., 334  
 Albrecht, D., 333  
 Albéric, P., 465, 480  
 Alçiçek, M., 345  
 Aldega, L., 300  
 Aleman, N., 111  
 Algouti, A., 51  
 Ali, T., 288  
 Aliaga, C., 509  
 Aliouane, L., 86, 286, 289, 488  
 Alizert, L., 27  
 Allaire, G., 312  
 Allanic, C., 491, 493  
 Allard, P., 46  
 Allard, T., 386, 435  
 Allek, K., 453  
 Allègre, C., 267  
 Allègre, V., 286, 294  
 Almar, R., 112  
 Aloisi, G., 116  
 Alonso, B., 80  
 Alphonse, V., 426  
 Alterio, I., 496  
 Alvarado, A., 35  
 Alvarez-Zarikian, C., 94, 270  
 Alves, D., 100, 151, 156  
 Aly, M., 258  
 Amblàs, D., 88  
 Ambroise, B., 293  
 Amédéo, F., 304  
 Amice, E., 426  
 Ammann, J., 164  
 Ammar, A., 80  
 Amortegui, A., 373  
 Amouroux, D., 222, 224, 426–428, 431, 437  
 Amri, I., 132  
 André, L., 442, 444  
 André-Mayer, A.-S., 353, 354, 368, 372  
 Andreani, M., 145, 473  
 Andreu, B., 258, 262  
 Andrieu, S., 121  
 Angelier, F., 437  
 Angeloni, P., 208  
 Angnuureng, D., 112  
 Angot, H., 427  
 Angrand, P., 231  
 Annen, C., 135, 140, 141  
 Annich, M., 361  
 Anquetil, C., 280, 282  
 Ansberque, C., 15, 35  
 Anschutz, P., 115, 118  
 Anselmetti, F., 14  
 Anthony, E., 49, 112  
 Antoine, C., 274  
 Antoine, R., 293  
 Antonio, P., 139, 255  
 Antonoff, V., 376  
 Appéré, T., 55  
 Aquilina, L., 449  
 Arafa, A., 66, 417, 455  
 Aray, J., 34  
 Arbaret, L., 138, 363  
 Arbia, A., 44  
 Arcay, D., 162  
 Ardebili, O., 373  
 Aretz, M., 68, 182, 248, 283  
 Arfib, B., 463, 464  
 Aridhi, S., 65  
 Ariztegui, D., 117  
 Arki, F., 41  
 Armand, R., 410  
 Arnaud, B., 234  
 Arnaud, F., 274  
 Arnaud, G., 112  
 Arnaud, N., 78, 169, 182, 217  
 Arndt, N., 129  
 Arnold, M., 31  
 Arnoux, B., 131  
 Arsenikos, S., 151  
 Artells, E., 397  
 Aslanian, D., 60, 75, 76, 79, 100, 149, 151, 154–157  
 Asmael, N., 449  
 Assayag, N., 196  
 Asses, A., 123  
 Aster Team, 15, 276  
 Astruc, C., 507  
 Atteia, O., 459  
 Aubert, J., 127  
 Aubourg, C., 61, 63, 83, 118, 199, 202, 212, 213, 228, 234  
 Aucan, J., 113  
 Aucour, A.-M., 408  
 Audemard, F., 34  
 Audétat, A., 362  
 Audigane, P., 103, 334  
 Audin, L., 14, 35, 156  
 Audru, J.-C., 42  
 Audry, S., 416  
 Auffan, M., 397, 473  
 Augé, T., 371  
 Auger, D., 428  
 Augier, R., 192, 341  
 Auguet, J.-C., 220  
 Augustin, J., 375  
 Auguy, C., 105, 106  
 Aullo, T., 422  
 Aumaitre, G., 31  
 Aung, L.L., 383  
 Authemayou, C., 9, 23, 75, 136, 151  
 Authier, L., 460  
 Auxière, J.-L., 60, 71, 79, 144, 261, 482, 483  
 Auzende, A.-L., 383, 390, 395  
 Averbuch, O., 69, 115, 213  
 Avigad, D., 188  
 Avouac, J-P., 16  
 Ayalew, D., 154  
 Aycaguer, P., 506  
 Aydda, A., 51  
 Azaroual, M., 442, 444

- Azdimousa, A., 80, 182  
Azevedo, C., 373  
Aziayibor, K., 112  
Azizi, S., 365
- B**
- Ba, A., 49  
Babault, J., 76, 244  
Babeyko, A., 163  
Babonneau, N., 39, 43, 90  
Baby, G., 17, 77, 78  
Baby, P., 61, 77, 199–201, 204–206  
Bacchiana, C., 498  
Bache, F., 75, 149, 154, 155  
Bachelery, P., 45, 90, 132, 142  
Baden, D., 309  
Bader, A.-G., 240, 329  
Badra, L., 355, 377  
Badsì, M., 149  
Baele, J.-M., 169, 340, 356, 364, 463  
Bagard, M.-L., 433  
Bahain, J.-J., 14  
Bahar Bahar, T., 421  
Baidada, B., 378  
Baillard, C., 167  
Baillet, L., 47  
Bailleul, J., 72, 73, 107  
Bailly, L., 372  
Bailly, T., 39  
Bailly-Comte, V., 466  
Bain, O., 23  
Baitelli, R., 117  
Baize, S., 244  
Bajddi, A., 370  
Bajolet, F., 63, 160  
Baklouti, S., 384  
Balestra, B., 269, 270  
Balestra, J., 507  
Ballard, J.-F., 151, 153, 199, 214, 215, 228  
Ballèvre, M., 191, 195, 228, 238  
Ballouard, C., 374  
Ballu, V., 164, 167  
Balme, M., 53  
Balouin, Y., 110  
Baltzer, A., 76, 100, 151, 156  
Bank, D., 365  
Baptiste, J., 188  
Baratoux, D., 255  
Baratoux, L., 255  
Barbanson, L., 355, 356, 377, 389  
Barbarand, J., 121, 206, 372  
Barbarin, N., 249  
Barbecot, F., 115  
Bard, E., 13, 221, 281  
Barde-Cabusson, S., 293  
Bareille, G., 221, 223  
Barhoun, N., 60, 79  
Baron, M., 212  
Baron, S., 379  
Barou, F., 129  
Barraza, F., 414  
Barré, G., 364  
Barre, J., 222, 224, 426, 428  
Barret, M., 427  
Barrier, A., 242  
Barrier, L., 68, 214  
Barrier, M., 234  
Barrier, P., 107  
Barrière, J., 19, 295  
Barruol, G., 480, 482  
Barsotti, V., 445  
Barthas, M., 228  
Barusseau, J.-P., 111  
Bascou, J., 140, 480, 482  
Bascou, P., 34  
Basile, C., 155, 232  
Bassetti, M.-A., 60, 67, 93, 94, 96, 149  
Bassinot, F., 90, 95  
Bastianini, L., 116  
Bastviken, D., 416  
Bataillard, P., 406  
Batailler, A., 45, 46  
Batiot-Guilhe, C., 466  
Baton, F., 252  
Battaglia-Brunet, F., 405, 406, 428  
Battail, B., 248  
Baudement, C., 44, 463  
Baudin, F., 91, 102, 116, 118, 119, 261, 281, 481–483, 511  
Baudin, T., 243, 254, 491–493  
Baudouin, C., 135  
Baudouin, V., 69  
Bauer, A., 396, 401  
Bauer, H., 26, 265, 284  
Baumann, J., 98  
Baumard, J., 370  
Baumberger, R., 492  
Bauve, V., 194  
Baya, P., 426, 437  
Bayet, L., 233  
Bayon, G., 78, 94  
Bayou, B., 489  
Beamud, E., 243  
Beaudoin, N., 241  
Beaufils, B., 327  
Beaufort, D., 102, 386, 390  
Beaufort, L., 45, 249  
Beaumont, V., 334, 335  
Beauvais, A., 9, 78  
Beccaletto, L., 188, 211  
Beck, C., 34  
Becker, R., 438  
Bedell, J.-P., 408  
Bedimo Bedimo, J.-P., 17  
Behar, F., 118  
Bejaoui, H., 65  
Béjina, F., 474  
Bekri, S., 314  
Belalia, A., 357  
Belaroui, L., 387  
Belbadaoui, M., 254  
Belkasmi, M., 354  
Bellahsen, N., 154, 191, 192, 196, 197, 230, 231, 233, 241  
Bellanger, M., 192  
Bellier, O., 10, 13, 15, 35, 36, 39, 43, 46, 195, 205, 206  
Bellot-Gurlet, L., 351  
Beltran, C., 269  
Beltrando, M., 192  
Ben Alaya, M., 448  
Ben Moussa, A., 80  
Ben Said, O., 421, 423  
Ben Salem, F., 423  
Benabbas, C., 31  
Benabdellouahed, M., 76, 100, 151, 154, 156  
Benahmed, N., 46  
Benahmed, S., 236, 245  
Benaissa, Z., 149  
Benali, H., 357, 370  
Benazzouz, B., 308  
Bendaoud, A., 130, 170  
Bendekken, A., 489  
Benedetti, L., 31, 36, 276  
Benedetti, M., 335, 404, 408, 432–434, 473  
Benedicto, A., 341  
Bengueddach, A., 387  
Benlaoukli, B., 455  
Benmansour, S., 123  
Benoit, M., 24, 129, 131, 132, 135, 138, 229, 253, 414  
Benoît, M., 434  
Benramdane, H., 357  
Bensalem, R., 31  
Bentellis A., 329  
Bentivegna, G., 327, 329  
Benyassine, E., 287  
Bérail, S., 221, 222, 224, 426–428, 431  
Berenguer, J.-L., 507–509  
Bergaya, F., 386  
Bergemann, C., 340, 341  
Berger, A., 340–342, 361  
Berger, G., 334  
Berger, J., 130, 141, 169  
Berger, P., 475  
Bergerat, F., 307  
Berglar, K., 154  
Bergonzini, L., 280  
Berlendis, S., 422  
Bermejo, R., 223  
Bernard, A., 372  
Bernard, O., 312  
Berné, S., 89, 93, 95, 96, 98  
Bernet, M., 167, 194, 231, 233, 237  
Bernier, F., 361  
Berrehouc, G., 320  
Berruyer, G., 472  
Bertalan, I., 474  
Berthelon, J., 203  
Berthet, T., 31  
Berthomieu, C., 406  
Bertin, D., 464  
Bertin, X., 109, 112  
Bertrand, B., 349  
Bertrand, C., 44, 328, 466  
Bertrand, L., 189  
Beslier, M.-O., 154, 155  
Besse, J., 62, 254, 493  
Besse-Hoggan, P., 400  
Bessin, P., 26  
Bessière, E., 138  
Bestani, L., 206  
Bésuelle, P., 317  
Bethoux, N., 155, 194  
Bettahar, A., 183  
Beucher, H., 14  
Bez, M., 153  
Béziat, D., 345, 347, 353–355, 359, 365, 368, 371, 379  
Bezoz, A., 9, 145  
Bhilisse, M., 131, 376  
Bialkowski, A., 27, 71  
Biari, Y., 76, 154  
Bibonne, R., 64  
Bichet, V., 18, 279  
Bichot, F., 453  
Bieber, A., 261  
Bigno, Y., 311  
Bigot, A., 34, 155  
Bigot, J.-Y., 10  
Bigot-Buschendorf, M., 482  
Bihannic, I., 317  
Bildstein, O., 294, 318  
Billant, J., 195  
Billeaud, I., 92  
Binet, S., 455, 465  
Bingen, B., 342  
Biondi, J., 380  
Bitri, A., 70  
Blamart, D., 272  
Blanc, F., 508, 509  
Blanchart, P., 383  
Blanchot, J., 113  
Blanpied, C., 8, 10, 64, 65, 67, 79, 101, 150, 151  
Blard, P.-H., 16, 212, 267, 269, 274–276  
Blein, O., 181, 254  
Blévin, P., 437  
Block, S., 185  
Blom, H., 257, 481  
Blotevogel, S., 416  
Blotin, L., 496  
Blouet, J.-P., 105  
Blundy, J., 135  
Boaventura, G., 431  
Bodilis, J., 422  
Bodinier, J.-L., 130, 132

- Boeglin, J.-L., 17  
Boiron, M.-C., 137, 363  
Boiron, T., 140  
Bolaños, R., 199, 200, 205, 206  
Bollinger, L., 42, 43  
Bolou Bi, C., 427  
Bomou, B., 266  
Bonasse-Gahot, M., 504  
Bonhoure, J., 378  
Bonin, P., 421  
Bonneau, L., 272  
Bonnell, C., 9, 61, 82, 116, 118, 211, 212  
Bonnelye, A., 298, 486  
Bonnemains, D., 145  
Bonnet, J., 372  
Bonnet, N., 78  
Bonnet, S., 16, 235, 244  
Bonniver, I., 464, 467  
Bonno, M., 182  
Bonnot, C., 432  
Bons, P., 178  
Bontemps, N., 486  
Bonvalot, S., 238  
Bonville, L., 348  
Bordenave, A., 83, 459  
Borderie, S., 204  
Bordes, C., 292, 295, 308, 487  
Bordes, J.-G., 346, 347  
Borgomano, J., 92, 123  
Bornert, M., 317  
Borschneck, D., 471  
Bosc, R., 370, 379  
Bosch, D., 168–171  
Bosch, G.V., 244  
Boschi, L., 156  
Bosq, A., 434  
Bossa, N., 471  
Bossard, N., 280  
Bosse, V., 129, 132, 339, 342, 498  
Bossy, C., 450  
Bot, A., 151  
Bottelin, P., 47  
Bottero, J.-Y., 397  
Bouabdellah, M., 365  
Bouaré, M., 359  
Bouaziz, S., 64  
Boubaya, D., 453  
Bouc, O., 443  
Bouchard, F., 437  
Boucher, A., 379  
Bouchette, F., 22, 39  
Bouchez, J.-L., 262  
Bouchilaoune, N., 357  
Bouffier, C., 44  
Bouftouha Y., 381  
Bougchiche, S., 489  
Bougeois, L., 67, 265  
Bouguern, A., 45, 453  
Bouhmadouche, F., 455  
Bouhnik-Le Coz, M., 404, 450  
Boukar, A., 488  
Boukhlof, W., 489  
Boularak, M., 31  
Boulart, C., 336  
Bouligand, C., 57  
Boullier, A.-M., 129, 299  
Boulvais, P., 171, 227–229, 354, 373, 374  
Boumehti, M.A., 131  
Bounajma, H., 356, 361  
Bouquerel, H., 164, 252  
Bour, I., 260  
Bourdet, A., 276  
Bourdier, J.-L., 132  
Bourg, A., 452, 460  
Bourg, I., 311  
Bourgeat-Lami, E., 385  
Bourgeois, O., 53–55  
Bourgeois, S., 280  
Bourges, P., 153  
Bourget, J., 95  
Bourgine, B., 493  
Bourillot, R., 122, 261  
Bourlès, D., 10, 13, 31, 75, 194, 267, 270, 275, 276, 345  
Bourmatte, A., 36  
Bourouis, S., 489  
Bouroullec, I., 500  
Bourque, H., 356  
Bourquin, S., 68, 248  
Bourrat, X., 208, 411  
Bourrin, F., 94  
Bousquet, R., 227, 228  
Boussafir, M., 282, 387  
Boussen, S., 409  
Bousserrhine, N., 426, 427  
Boussicault, M., 345  
Bout-Roumazeilles, V., 118, 270  
Boutaleb, A., 357  
Boutin, A., 228, 238  
Bouton, A., 122  
Boutoux, A., 191, 192, 196, 197  
Bouttemy, F., 507  
Bouya, N., 288  
Bouzemane, M., 41  
Bouزيد, A., 488, 489  
Boya, S., 235  
Boyce, A., 380  
Bracco, J.-P., 346  
Bracène, R., 149, 150  
Brach-Papa, C., 428  
Branellec, M., 39, 199  
Branquet, Y., 355, 361, 363  
Brant, J., 399  
Braucher, R., 10, 13, 18, 194, 270, 275, 276  
Braud, A., 409, 414  
Braun, J., 17, 211, 267  
Braun, J.-J., 17  
Bravin, M., 404, 405  
Brayard, A., 122, 249, 260  
Breillat, N., 362  
Brenot, A., 492  
Briais, J., 60, 62, 70  
Brichau, S., 201, 203  
Brigaud, B., 121, 307, 308, 371  
Briois, V., 396  
Brito, D., 292, 295, 308, 487  
Brizzi, R., 312  
Brocheray, S., 89  
Brouand, M., 364  
Broucke, O., 76, 78, 118, 153  
Bru, N., 109, 223  
Bruand, A., 465  
Brugier, Y., 132  
Bruguier, O., 168–171, 353  
Brullhet, J., 14  
Brun, J.-P., 58  
Bruneau, B., 119  
Bruneau, L., 259  
Bruneaux, M., 388  
Brunelle, A., 473  
Brunelli, D., 473  
Brunet, F., 131, 330, 335, 361  
Brunet, P., 466  
Brunier, G., 49  
Brunner, J., 286, 456  
Brunstein, D., 267  
Brusset, S., 61, 105, 106, 199–201, 204, 206, 231  
Buatier, M., 217, 389  
Budzinski, H., 437  
Bueno, M., 407, 431, 437  
Bugnazet, D., 472  
Buisson, M., 118  
Bujan, S., 111  
Buoncrisiani, J.-F., 252, 254, 257  
Bureau, D., 102, 105  
Bureau, F., 422  
Bureau, S., 408  
Burg, V., 386  
Burgio, M., 505, 507  
Burmester, R., 242  
Burnard, P., 135, 146  
Burnol, A., 103, 428  
Burov, E., 203  
Buscail, R., 94, 280  
Busigny, V., 252  
Buss, H., 433  
Bustamante, P., 437  
Bustnes, J.O., 437  
Busto, J., 286, 456  
Butault, C., 100, 101  
Bylund, K., 122, 249, 260  
Bystricky, M., 474
- ## C
- Caballero, Y., 465  
Cabaret, O., 463  
Cabre, A., 15  
Caby, R., 168–170  
Caer, T., 207  
Cagnard, F., 243, 492  
Cagnat, X., 224, 225  
Cagnon, C., 421, 424  
Cagnoni, A., 492  
Caillaud, A., 77  
Caillaud, J., 217  
Cailleau, B., 163  
Caillet, C., 396  
Caillon, N., 480  
Calandra, H., 504  
Calas, A., 414  
Calderon, Y., 61, 77, 106, 199–201, 205, 206  
Caline, B., 116, 304  
Callot, J.-P., 39, 82, 84, 172, 199, 200, 202, 206, 211–214, 292  
Calves, G., 61, 77, 78, 104–106, 199  
Calvet, M., 54, 126, 245, 275, 276  
Calvín-Ballester, P., 242, 300  
Calzas, M., 478  
Camarero, L., 220  
Camerlenghi, A., 100  
Camerlynck, C., 32  
Camilleri, V., 406  
Camoin, G., 478  
Campillo, M., 486  
Campmas, L., 22  
Campos, E., 19  
Camus, Q., 361  
Canals, M., 88  
Canamas, E., 507  
Cancès, B., 407  
Cancouet, R., 22  
Candaudap, F., 429, 450  
Caner, L., 390  
Canérot, J., 64, 497, 501  
Cannat, M., 146, 478  
Canning, J., 88  
Cano, Y., 42, 43  
Canto Toimil, N., 327, 329  
Capar, L., 70, 211, 492  
Capdeville, B., 42  
Capella, W., 39  
Cappa, F., 44  
Caquineau, T., 252  
Carapezza, M.-L., 293  
Caravaca, G., 122  
Carcaillet, J., 34, 236  
Carcel, D., 257  
Carcone, J., 26  
Cardin, P., 126  
Cardinal, D., 480  
Caricchi, C., 300  
Carignan, J., 427, 433, 437  
Carlut, J., 252  
Carola, E., 231  
Caron, B., 196  
Caron, M., 82  
Caron, V., 72, 73, 107  
Carpentier, C., 230

- Carp, S., 55  
 Carrasquero S., 348  
 Carretier, S., 14, 15, 17, 19, 167, 235, 238, 244  
 Carrier, B., 317  
 Carriere, M., 399  
 Carruthers, D., 105  
 Carry, N., 18, 180, 266  
 Carter, A., 203  
 Cartigny, P., 196, 252, 253  
 Cartwright, J., 102, 105  
 Carvajal, C., 46  
 Casanova, V., 362  
 Casas, J.M., 186–188  
 Casas-Ponsatí, A., 241  
 Casas-Sainz, A., 241–243, 300, 320  
 Casciello, E., 200  
 Casenave, V., 104  
 Castelain, T., 336  
 Castelle, B., 110–112  
 Castilla, R., 151  
 Castillo, H., 472  
 Castillo-Michel, H., 416, 474  
 Castiñeiras, P., 181, 186, 187  
 Castorina, F., 378  
 Catheline, S., 486  
 Cathelineau, M., 171, 374  
 Catrouillet, C., 404  
 Cattaneo, A., 90, 91, 101  
 Cattani, F., 173  
 Cattin, R., 31, 193  
 Caumon, G., 84, 274, 303  
 Cauquil, B., 308  
 Cauquil, E., 103  
 Cauuet, B., 345, 348  
 Caux, S., 346, 347  
 Caxeiro, C., 96, 102  
 Cauzid, J., 372  
 Caval, D., 225  
 Cazes, G., 18  
 Cébron, A., 422  
 Celle-Jeanton, J., 449  
 Cenacchi Perreira, A., 385  
 Cenki-Tok, B., 173, 180, 184  
 Ceramicola, S., 101  
 Cerepi, A., 82, 85, 288, 328  
 Cerpa, N., 161  
 Certain, R., 111  
 Ceuleneer, G., 283, 336, 478  
 Cézac, P., 442, 444  
 Chaaban, A., 396  
 Chabard, D., 118  
 Chabaud, L., 92, 93, 97  
 Chabaux, F., 13, 433  
 Chabot, V., 503  
 Chaffel, P., 151  
 Chafiki, D., 64, 66, 260  
 Chaix, C., 67  
 Chamboredon, R., 137  
 Chamot-Rooke, N., 144, 151  
 Champagnac, J.-D., 18, 195  
 Champallier, R., 138, 299  
 Chanceaux, L., 140  
 Chanel, O., 46  
 Chang, C., 8  
 Chanier, F., 72, 73, 107, 149, 150, 213, 261  
 Chanvry, E., 82  
 Chapon, V., 406  
 Chaponniere, P., 377  
 Chapron, E., 13, 14, 221, 282, 480  
 Charbonnier, C., 115  
 Chardon, D., 9, 63, 76, 78, 153, 182, 183, 199  
 Charles, N., 355, 368  
 Charlet, L., 405  
 Charlier, K., 266  
 Charlier, T., 238  
 Charpentier, D., 217, 389  
 Charreau, J., 16, 84, 212, 213, 267, 269, 274, 275  
 Charrier, R., 14  
 Charvis, P., 160  
 Chassagnac, D., 72  
 Chassiot, L., 13, 282, 480  
 Chastel, O., 437  
 Chateauminois, E., 110  
 Chateaufort, J.-J., 265  
 Chatelée S., 72  
 Chaumillon, E., 42, 69, 109, 112  
 Chaurand, P., 397, 471  
 Chauvaud, L., 426  
 Chauvel, C., 267  
 Chauvet, A., 373, 377  
 Chauvin, A., 58  
 Chavagnac, V., 283, 336, 480  
 Cheilletz, A., 356, 361, 365  
 Chelalou, R., 228  
 Chellai, E. H., 84  
 Chemed, Y., 383  
 Chen, H., 474  
 Chen, Y., 355  
 Chène, F., 500  
 Chenot, E., 259  
 Chermali, M., 288, 328  
 Cherneva, Z., 342  
 Cherubini, C., 410, 487  
 Chéry, J., 18, 29, 193, 244, 478  
 Chetouani, K., 132  
 Chevalier, C., 113  
 Chevet, J., 480, 483  
 Chevillard, M., 342  
 Chevrement, P., 371, 500  
 Chevrot, S., 235, 245  
 Chiffolleau, J.-F., 428  
 Chinarro Vadillo, D., 465  
 Chmeleff, J., 450  
 Choblet, G., 9  
 Choignard, J., 499  
 Chokri, Y., 260  
 Chopin, F., 179, 184  
 Choulet, F., 341, 355, 389  
 Chouvelon, T., 428  
 Christophoul, F., 14, 231, 235, 237, 239, 240, 244, 348  
 Ciancaleoni, L., 370, 379  
 Cibaj, I., 205  
 Ciobanu, C.S., 400  
 Claes, S., 307  
 Claret, F., 317, 334  
 Claustres, A., 221, 224, 225  
 Clauzon, G., 60  
 Claverie, M., 384  
 Clerc, C., 153, 227, 238  
 Clergue, C., 433  
 Clerjon, A., 487  
 Cleyet-Marel, J.-C., 407  
 Clifton, P., 474  
 Cloquet, C., 427, 433, 450  
 Cluzel, D., 26, 27  
 Clément, F., 199  
 Coasne, B., 312  
 Cochelin, B., 183  
 Cochonneau, G., 50  
 Coco, G., 110  
 Cocquerez, T., 259  
 Coelho, D., 314  
 Coelho, G., 363  
 Coffinet, S., 280, 282  
 Coge, A., 267  
 Cohen, G., 288, 328, 459  
 Cojan, I., 14, 388  
 Colin, C., 90, 266, 272  
 Colin, L., 507  
 Colin, S., 342  
 Collell, J., 311  
 Collet, L., 298  
 Colleté, C., 495  
 Collin, F., 320, 390  
 Collin, P.-Y., 83, 303, 305, 307  
 Collon-Drouaillet, P., 84, 454, 464  
 Colombet, Y., 110  
 Colombi, A., 487  
 Colombié, C., 257  
 Combaud, A., 298  
 Combourieu Nebout, N., 270  
 Condom, T., 275  
 Conesa, G., 93  
 Conin, M., 164, 303, 478  
 Conway, S., 53  
 Coppin, F., 406  
 Corbeau, J., 164, 165  
 Cordier, C., 129  
 Cordier, E., 110  
 Corela, C., 151  
 Cornet, T., 54  
 Cornu, J.-Y., 409  
 Cornuault, M., 268  
 Cornée, A., 496  
 Cornée, J.-J., 80, 162  
 Corradi, N., 155  
 Corrado, S., 300  
 Corre, B., 228, 238  
 Corriveau, L., 182, 376  
 Corrêa, I., 117  
 Corsellis, Y., 423  
 Corsini, M., 80, 162, 181, 182, 184, 217, 500, 505  
 Cossa, D., 429, 437  
 Costin, G., 133  
 Cotte, M., 472  
 Cotte, N., 34  
 Cottin, J.-Y., 480, 482, 483  
 Couëffé, R., 60, 492  
 Coulibaly, M., 204  
 Couppey, G., 42  
 Courbet, C., 503  
 Courboulès, F., 29, 30, 507  
 Courel, B., 281  
 Courjault-Radé, P., 416  
 Cournède, C., 255  
 Courrech Du Pont, S., 53  
 Courrioux, G., 491, 493  
 Courty, M.-A., 54, 347  
 Cousquer, Y., 452  
 Coustures, M.-P., 345  
 Couture, R.-M., 405  
 Couzinié, S., 138, 177, 180  
 Crampon, M., 422  
 Cravo-Laureau, C., 283, 421, 424  
 Crawford, W., 167  
 Créach, R., 24  
 Cremer, M., 89, 97  
 Crest, Y., 275  
 Creux, P., 475  
 Crispi, O., 433  
 Critelli, S., 11  
 Crochet, S., 428  
 Crognier, N., 208, 234  
 Crombez, V., 72  
 Crosta, X., 480  
 Crouzet, C., 34, 191, 274  
 Crozier, D., 41  
 Crozon, J., 164  
 Crumeyrolle, P., 212  
 Cruz, A., 71  
 Cuchí Oterino, J., 465  
 Cuevas, J., 233  
 Cuisinier, O., 317  
 Cuney, M., 141, 374, 375, 377, 378  
 Cuny, P., 421, 423  
 Cuq, V., 111  
 Cushing, M., 39  
 Cussey, R., 497  
 Cuvier, A., 224, 225  
 Cyr, M., 384
- ## D
- d'Acremont, E., 35, 80, 101  
 D'agosto, F., 385  
 D'agrella-Filho, M., 139, 255  
 D'ambrogio, C., 492  
 D'amico, F., 223  
 D'errico, F., 349  
 Dabard, M.-P., 248

- Daif, M., 66, 172, 417  
Dairou, J., 335  
Dali, Y., 387  
Dalibard, M., 60  
Daliran, F., 373  
Damnati, B., 271  
Dangla, P., 303  
Daniau, A.-L., 269  
Daniel, J.-M., 214  
Dannowski, A., 160  
Dano, A., 160  
Dantas, E., 77  
Daoud, M., 144  
Daoudi, L., 64, 320  
Dardé, B., 139  
Darfeuil, S., 281  
Darmoul, Y., 327  
Darnault, R., 194, 214  
Darrozes, J., 416  
Dasgupta, R., 172  
Daugas, F., 83  
Daupley, X., 44  
Dausse, A., 467  
Dauteuil, O., 77, 153, 215  
Dautria, J.-M., 130, 238  
Dautriat, J., 304, 305  
Daval, D., 330  
David, C., 298, 303–305, 307, 486  
Davis, J., 311  
Davis, T., 207  
Davranche, M., 404, 411  
Davy, P., 16  
Dayet Bouillot, L., 349  
De Ascensão Guedes, R., 339  
De Barros, L., 486  
De Bremond D'ars, J., 486  
De Broucker, G., 499  
De Clarens, P., 150  
De Diego Rodriguez, A., 220, 222  
De Fouquet, C., 503  
De Garidel-Thoron, T., 90, 95  
De La Rosa, D., 427  
De La Taille, C., 34  
De La Torre, Y., 110  
De Min, L., 162, 164  
De Mol, B., 88  
De Oliveira, D.C., 139, 255  
De Parseval, P., 228, 384  
De Putter, T., 356  
De Raféllis, M., 265, 269  
De Rycker, K., 34  
De Saint Blanquat, M., 129, 132, 135, 138, 140, 141, 228, 229, 238  
De Saint-Simon, P., 369  
De Santiago, I., 109, 110  
De Sigoyer, J., 15  
de Straerke, D., 509  
De Vernal, A., 268  
De Vleeschouwer, F., 225, 270  
De Voogd, B., 164  
De Wever, P., 496, 500  
De-Oliveira, E., 20  
Deaconu, S., 60  
Debat, P., 129, 132, 354, 355  
Deborde, C., 49  
Debret, B., 173  
Debroas, E.-J., 242  
Decarlis, A., 152, 192  
Decitre, J.-B., 286, 456  
Deck, O., 41  
Deconinck, J.-F., 259, 308, 511  
Decrée, S., 340, 356  
Defaflia, N., 271  
Deffontaines, B., 50  
Degbe, G., 112  
Dekayir, A., 287  
Dekeyser, D., 507  
Dekoninck, A., 372  
Del Net, W., 471  
Delacour, A., 229, 283, 480  
Delacourt, C., 22  
Delanghe-Sabatier, D., 39  
Delaplace, P., 47, 288, 328  
Delarue, F., 282  
Delavaud, E., 39  
Delcaillau, B., 9, 10  
Delcher, E., 293  
Delchini, S., 208  
Deletraz, G., 222, 224  
Delfaud, J., 496  
Delli Rocioli, M., 31  
Dellinger, M., 433  
Delmas, M., 275, 276  
Delmas, R., 505  
Delor, E., 34  
Delottier, H., 453  
Delouis, B., 30, 194  
Deloule, E., 137, 170, 353, 356, 361, 364, 471  
Delpech, G., 16, 371, 480, 483  
Delpoux, S., 450  
Delvigne, V., 346  
Demaiffe, D., 356  
Demory, F., 274  
Demouy, S., 135  
Denaix, L., 417  
Deneele, D., 383, 385  
Denèle, Y., 179, 183, 233, 253  
Denieul, M., 43  
Denimal, S., 466  
Denis, A., 466  
Denniellou, B., 91, 96  
Denti, M., 58  
Dépernet, C., 409  
Deprez, A., 144  
Dera, G., 250, 259, 261  
Derenne, S., 280, 282  
Deroin, J.-P., 50  
Désaubliaux, G., 122  
Desaunay, A., 459  
Desbois, G., 317  
Descamps, F., 304  
Deschamps, A., 22, 30, 43, 111, 164  
Deschamps, R., 82  
Descostes, M., 386  
Desmares, D., 258, 261  
Desmau, M., 473  
Desprat, S., 265, 269  
Dessa, J.-X., 155  
Dessert, C., 433  
Detandt, G., 112  
Devau, N., 445  
Deveaud, S., 136, 141, 361  
Develle, A.-L., 274  
Devenon, J.-L., 113  
Déverchère, J., 29, 150  
Devi, M., 295  
Deville, E., 334, 335, 366  
Dewaide, L., 463, 464  
Dewandel, B., 452  
Dezayes, C., 492  
Dezileau, L., 40, 43  
Dhont, D., 61, 103  
Di Giovanni, C., 13, 14, 265, 282, 284  
Di Muro, A., 132  
Di Tullo, P., 407  
Dia, A., 404  
Diament, M., 478  
Diaz, J., 235, 504  
Dick, P., 298, 486  
Didier, A., 339, 342  
Didier, C., 327, 329  
Diepolder, G., 492  
Dietrich, M., 35, 295, 487  
Diot, H., 130, 141, 169  
Diot, X., 76  
Diraison, M., 189, 300  
Djae, T., 405  
Djeddi, M., 488  
Djeddi, R., 183  
Djelit, H., 149  
Djerrab, A., 271  
Do Couto, D., 60  
Doan, M.-L., 217  
Dobritzsch, D., 474  
Doelsch, E., 405  
Dohm, J., 53  
Dolgoplova, A., 171  
Domerg, M., 223  
Dominguez, S., 16, 18, 36, 40, 207, 212  
Dommergue, A., 427, 438  
Donard, O., 224  
Donati, E., 507  
Donnadieu, Y., 254, 257, 259, 266, 272  
Donze, F., 486  
Dorel, M., 112  
Dörr, W., 342  
Dos Reis, T., 71, 75  
Doublet, C., 448  
Dobre, C., 144, 156, 157  
Douceré, M., 379  
Doucet, L.-S., 483  
Douchet, C., 450  
Douez, O., 453  
Douville, E., 266  
Dransart-Laborde, A., 68  
Driehaus, L., 214  
Driouch, Y., 129, 132, 354  
Driussi, O., 261  
Drouillet, M., 171  
Droz, L., 75, 79  
Druitt, T., 137  
Du Bernard, X., 215  
Du Penhoat, Y., 112  
Du, B., 428  
Dubacq, B., 174, 233  
Dubernet, S., 351  
Dublet, G., 390  
Dubois, M., 44, 70, 234, 242, 320, 349, 373, 374, 380, 417, 443  
Dubois-Dauphin, Q., 266, 272  
Duboscq, K., 424  
Dubucq, D., 103  
Ducassou, E., 92–94, 97, 98, 269, 270  
Duchene, S., 342  
Duclercq, J., 407  
Ducoux, M., 243  
Dufréchou, G., 182, 245, 376  
Dufrière, J.-F., 312  
Dugue, O., 60  
Duluc, C.-M., 24  
Dumas, A., 388  
Dumas, C., 257, 259, 272  
Dumas, N., 409  
Dumas, P., 473  
Dumat, C., 414–416, 418  
Dumbrell, A., 424  
Dumon, A., 109  
Dumoulin, C., 9  
Duperray, B., 43  
Duperré, A., 23, 46, 213  
Dupont, J.-P., 287, 467  
Dupont-Nivet, G., 67, 265  
Dupraz, C., 122  
Dupraz, S., 405  
Dupuis, C., 60  
Dupuis, M., 101, 106  
Dupuis, R., 434  
Dupuy, A., 449, 452–454  
Duran, L., 467  
Duran, R., 421, 423, 424  
Durand, C., 218, 339, 341, 374  
Durand, J., 506  
Durand, V., 288, 290  
Durepaire, X., 466  
Duret, T., 173, 179  
Durieux, A., 506  
Durlé, C., 308  
Durrieu De Madron, X., 94

Dussouillez, P., 39, 43, 49  
Dzana, J.-G., 17  
Dzikowski, M., 448

## E

Eberli, G., 92  
Ebigbo, A., 333  
Edel, J.-B., 184  
Ederra, A., 223  
Eglinger, A., 353  
Eglinton, T., 283  
Egoroff, G., 496  
Eichenberger, U., 18  
Eilers G., 348  
Eklund, O., 179  
El Arbaoui, A., 379  
El Basbas, A., 368  
El Boudour El Idrissi, H., 320, 390  
El Desouky, H., 82  
El Ettachfani, M., 258  
El Ghorfi, M., 356  
El Haddi, H., 65  
El Hayek, E., 414  
El Houicha, M., 184  
El Kazzi, V., 417  
El Kilany, A., 265  
El Maz, A., 377  
El Moussaoui, S., 11, 113  
El Omari, K., 139  
El Ouahabi, M., 320, 390  
El Ouardi, H., 288, 381  
El Samrani, A., 414, 417  
El Talibi, H., 11, 113  
Elineau, S., 23, 46  
Elkalki, Y., 271  
Elliot, M., 9  
Ellouz-Zimmermann, N., 164, 165  
Elustondo, D., 222, 223  
Emblanch, C., 466  
Emily, E., 255  
Emmanuel, L., 241, 262  
Eng, P., 473  
Engi, M., 191  
Ennaciri, A., 355, 356, 370, 389  
Ennih, N., 169  
Enrico, M., 220, 224, 225  
Equipe « Rgf-Demo », 491  
Erauso, G., 336  
Ercilla, G., 80  
Ernenwein, J.-P., 456  
Escalon, V., 368  
Escarguel, G., 122, 249, 260  
Escartin, J., 145  
Espinoza, D., 303  
Espinoza, R., 50  
Espurt, N., 189, 200, 205, 206, 231  
Essaifi, A., 379, 380  
Essalhi, M., 373  
Essefi, H., 260  
Estrade, G., 368

Etabaai, I., 271  
Ethève, N., 79, 150  
Etoubleau, J., 375  
Eude, A., 199, 201  
Evain, M., 76, 100, 151, 154, 156, 161, 164  
Evans, D., 353, 365  
Evrard, C., 375  
Eynaud, F., 90, 95, 269  
Ezcurra, A., 221

## F

Fabuel-Perez, I., 84  
Faccenna, C., 160, 168  
Fadel, A., 481  
Fagel, N., 270, 320, 384, 390  
Fairon, M., 261  
Fajardo, A., 202  
Fakih, M., 404  
Falzon, M-F., 284  
Fara, E., 122, 249, 260  
Faralli, A., 506  
Fargier, Y., 293  
Fariás, M., 14  
Farrell, K., 334  
Farret, R., 326, 327, 329  
Fasentieux, B., 61, 118, 496  
Faucon, M.P., 415  
Fauconnier, J., 185  
Fauguerolles, C., 336  
Fauquembegue, K., 90, 95  
Fauquette, S., 194, 236  
Faure, F., 129, 135  
Faure, M., 181, 188, 341  
Fauré, P., 262  
Favreau, O., 84  
Fawaz, A., 8, 10  
Fay Gomord, O., 304  
Fayard, B., 472  
Fayol, N., 368  
Fayolle, E., 69  
Fedez-Ortiz De Vallejuelo, S., 220  
Fedorik, J., 100, 101  
Fehn, C., 492  
Feigl, K., 244  
Fekirini, M., 320  
Feld, A., 154-156  
Feliu, C., 281  
Fellah, A., 66  
Feneyrol, J., 370, 379  
Feng, C., 426-428  
Feng, X., 428  
Ferdinand, A., 18  
Ferhat, M., 123  
Ferlat, G., 363, 366  
Fernandes, P., 346  
Fernandez, L., 168, 169  
Fernandez, M., 200  
Fernandez-Martinez, A., 395, 399, 473  
Fernandez-Ortiz De Vallejuelo, S., 220  
Fernandez-Rojas, L., 398

Ferrah, Y., 455  
Ferrand, J., 349  
Ferré, E.E., 140  
Ferreira, N., 229  
Ferreiro-Mahlmann, R., 72  
Ferry, M., 30, 31  
Ferry, S., 91, 258  
Fevrier, L., 406  
Fialips, C., 386  
Field, B., 72  
Figueiredo, M., 417  
Filizola, N., 50  
Fillon, C., 482  
Finizola, A., 293  
Fink, H., 266  
Fiorentino, E., 295  
Flament, P., 384  
Fleurant, C., 54  
Fleury, J., 36, 43, 49  
Floc'h, F., 22, 111, 112  
Flood, R., 94  
Floodpage, J., 60, 79  
Florentin, L., 137  
Flores, J.A., 94, 269, 270  
Floriani, M., 406  
Florsch, N., 350  
Flueh, E., 160  
Fluteau, F., 254, 260  
Foan, L., 223, 224  
Folcher, N., 26  
Fontaine, F., 480  
Fontboté, L., 362  
Forano, C., 400  
Ford, M., 231, 239, 240, 274  
Fortin, J., 303, 307  
Fortunato, A., 109  
Fosse, C., 282  
Fouateu, R., 384, 390  
Foubert, A., 105  
Foucault, Y., 418  
Foukrache, M., 456  
Fouquet, Y., 375  
Fourcade, S., 228, 238  
Fourdrin, C., 386  
Fournier, A., 57, 127  
Fournier, F., 92, 123  
Fournier, L., 45, 90, 94, 95  
Fournier, M., 467  
France, L., 135, 146, 174, 185  
Franceschi, M., 122, 328, 448  
Francis, O., 463  
François, A., 349  
François, C., 252  
Frank, N., 266, 272  
Franke, D., 144  
Franzetti, M., 22  
Frère, A., 213  
Freslon, N., 75  
Fressard, M., 40, 49  
Fréville, K., 180, 181, 184  
Fritsch, E., 390  
Frizon De Lamotte, D., 62, 79, 150, 151, 168,

177

Fu, B., 68  
Fu, X., 435  
Fuck, R., 151  
Fuegenschuh, B., 191  
Fuentes Cid, A., 20  
Funicello, F., 160, 163  
Fuss, G., 84

## G

Gabalda, G., 238  
Gabalda, S., 491-493  
Gabillard, S., 492  
Gaboreau, S., 317  
Gabrieli, J., 415  
Gabrielsen, G.-W., 437  
Gadenne, L., 299  
Gaffet, S., 286, 456  
Gagala, L., 201, 202, 205  
Gagliardini, E., 472  
Gaillard, I., 418  
Gaillard, N., 365  
Gaillardet, J., 433  
Gailler, A., 24, 43, 154, 155  
Gal, F., 326, 327  
Galand, P., 220  
Galaup, S., 85, 122  
Gallais, F., 163  
Gallet, Y., 57, 58  
Galliero, G., 311, 314  
Gallot, T., 486  
Galop, D., 221, 224, 225  
Galve, A., 160  
Gandois, L., 438  
Gandolfi, J.-M., 456  
Ganino, C., 170  
Ganne, J., 135, 179, 185, 354  
Ganzer, L., 333  
Ganzhorn, A.-C., 178, 179  
Gaouzi, A., 373  
Gapais, D., 214  
Garaebiti, E., 167  
Garambois, S., 34, 35, 292, 295, 453, 487  
Garcés, M., 243  
García Moreno, R., 349  
García Praça Leite, M., 417  
García, A., 53  
García, B., 288, 328, 330  
García, D., 82, 242  
García-Castellanos, D., 200  
García-Lasanta, C., 243, 300  
Gardien, S., 486  
Gardien, V., 177, 180, 181, 194  
Gardner, M., 109  
Garel, E., 449  
Garel, S., 118  
Gargani, J., 41  
Garlan, T., 22, 45, 90, 95-97  
Garnier, C., 405  
Garnier, J., 432  
Garrido, C.J., 132  
Garrido, F., 428

- Garziglia, S., 24  
 Gasquet, D., 356, 361, 365, 373, 448  
 Gassie, C., 424  
 Gastaud, P., 41  
 Gattacceca, J., 10  
 Gaucher, E., 84, 326, 442  
 Gaudemer, Y., 68  
 Gaudet, J.-P., 415  
 Gaudin, M., 89  
 Gaulier, J.-M., 205  
 Gaullier, V., 149, 150, 155, 213  
 Gautheron, C., 16, 76, 206, 231, 237  
 Gauthier, A., 44, 320, 408, 417, 418, 443  
 Gauthier, E., 279  
 Gautier, P., 171, 342  
 Gautret, P., 405  
 Gay, A., 104, 106, 237  
 Gayer, E., 14  
 Ge, T., 347  
 Géant-Caparros, L., 349  
 Gébelin, A., 180  
 Gelabert, A., 408, 432, 473  
 Géli, L., 149  
 Gélis, C., 39  
 Genevey, A., 57, 58  
 Genot, E., 49  
 Gentes, FS., 426  
 Genti, M., 18, 29, 193  
 Geoffroy, L., 144, 147, 151  
 Geokin3dpyr Group, 232  
 Georgieva, M., 342  
 Gérard, E., 336  
 Gérard, M., 336  
 Gerard, J., 98  
 Géraud, Y., 189, 300  
 Geraud, Y., 304, 315  
 Gerbault, M., 161, 181, 184, 185  
 Gerbe, M.-C., 140, 480  
 Gerdes, A., 188  
 Gerdjikov, I., 342  
 Géréa, C., 199  
 Gerya, T., 369  
 Getto, D., 452  
 Ghafoor, A., 418  
 Ghalamghash, J., 373  
 Gharbi, M., 205  
 Gharzouni, A., 384  
 Ghestem, J.-P., 428  
 Ghienne, J.-F., 184  
 Ghirardi, J., 265, 284  
 Giacomini, A., 449  
 Gibb, O., 268  
 Gibert, D., 486  
 Gigoux, M., 371  
 Gil Garbí, H., 276  
 Gil Imaz, A., 243  
 Gil, W., 201  
 Gilbert, B., 395, 401  
 Gilbert, F., 421  
 Giletycz, S., 8  
 Gillet, H., 89, 92, 96, 97  
 Gillet, K., 54  
 Gillet, N., 57  
 Gillette, S., 349  
 Giot, R., 303  
 Girard, A., 205  
 Girard, J.-P., 83, 85  
 Giraud, F., 248, 257, 258  
 Giraud, X., 281  
 Giraudeau, J., 93  
 Giresse, P., 94, 149  
 Giuliano, J., 236  
 Giunta, T., 448  
 Gley, R., 396, 401  
 Glinsky, N., 503  
 Gloaguen, E., 342, 361  
 Glodny, J., 163  
 Gnos, E., 340, 341  
 Gobeil, C., 115  
 Godard, V., 13, 15, 35  
 Godefroy, G., 84  
 Goix, S., 418, 434  
 Golfier, F., 333  
 Golovin, A., 133  
 Gombert, P., 41, 44, 51, 327, 329  
 Gómez-Gras, D., 235  
 Gomez, J., 150  
 Gomez-Rivas, E., 178  
 Gommeaux, M., 407  
 Goncalves, P., 180, 218, 339, 341, 374  
 Gondard, M., 424  
 Goñi-Urriza, M., 424  
 Gonthier, E., 92, 98  
 Gontier, E., 474  
 Gonzales, M., 69  
 Gonzalez, A., 220, 398, 431  
 Gonzalez, L., 223  
 Gonzalez, P., 426  
 Gonzalez-Holguera, J., 401, 410  
 Gonzalez-Penagos, F., 203  
 Goodenough, F., 380  
 Gorini, C., 8, 10, 35, 60, 71, 75, 79, 80, 91, 149  
 Got, P., 421  
 Götzl, G., 492  
 Gouin, J., 342  
 Goula, X., 244  
 Gourlan, A., 267  
 Gourronc, M., 55  
 Gout, C., 298, 300, 486  
 Goutte, A., 437  
 Grabkowiak, A., 168  
 Graciaa, A., 475  
 Graillet, D., 460  
 Graindorge, D., 22, 36, 150, 151, 161, 163, 164  
 Grall, C., 155  
 Grand'homme, A., 339, 340  
 Grandin, R., 144  
 Grandjean, P., 112  
 Grangeon, S., 406  
 Granier, G., 450  
 Granjeon, D., 71, 75, 211  
 Grasseau, N., 83  
 Grasset, L., 282  
 Grasso, J.-R., 488  
 Grataloup, S., 329  
 Gratier, J.-P., 217  
 Grauby, O., 384, 390  
 Graveleau, F., 10, 149, 204, 213  
 Gredilla, A., 220  
 Greenish, A., 369  
 Greff, M., 62, 254  
 Grégoire, D., 313, 315  
 Grégoire, M., 129, 131, 132, 138, 480  
 Grélaud, C., 83, 121, 212  
 Grellier, S., 327  
 Griffin, W., 480  
 Grimalt, J., 269  
 Grimaud, F., 236, 245  
 Grimaud, J.-L., 9, 76, 78  
 Grimaud, S., 511  
 Groleau, A., 327  
 Grool, A., 231, 239  
 Grosheny, D., 91, 258  
 Grosjean, A.-S., 194  
 Grossi, V., 115, 117, 279, 283  
 Groulier, P.-A., 368  
 Gruau, G., 404  
 Gruneisen, P., 507  
 Guan, H., 147  
 Guatarbes, B., 292  
 Guédron, S., 414, 426, 428  
 Guégan, R., 385, 387, 389, 400  
 Guéguen, Y., 303  
 Gueguen, P., 487  
 Guélard, J., 335  
 Guelmi, S., 183  
 Guénet, H., 404, 411  
 Guennoc, P., 491, 492  
 Guentas-Dombrowski, L., 336  
 Guerin, T., 69, 112  
 Guerrot, C., 180, 270, 362, 371  
 Guerton, F., 475  
 Guglielmi, Y., 44, 298, 300, 309, 463, 486  
 Guichong, W., 206  
 Guidat, T., 53  
 Guilbert, N., 299  
 Guillaume, B., 167  
 Guillaume, D., 16, 138, 340, 362, 363, 366, 480  
 Guillaumet, M., 386  
 Guillem, G., 269  
 Guillemot, T., 279  
 Guillen, A., 491, 493  
 Guillerm, E., 185  
 Guillocheau, F., 17, 26, 60, 62, 63, 70, 75-78, 104, 153, 234  
 Guillon, C., 69  
 Guillot, F., 69, 115  
 Guillot, S., 167, 170, 171, 173, 193, 194  
 Guillou, V., 275  
 Guillou-Frottier, L., 361, 369  
 Guimarães, E., 432  
 Guinard, M., 507  
 Guiné, V., 459  
 Guinoiseau, D., 432  
 Guiraud, J., 358  
 Guizan Silva, C., 71  
 Gulon, T., 427  
 Gumiaux, C., 183, 192, 243, 361  
 Gunnell, Y., 275, 276  
 Gustavsson, M., 416  
 Gutierrez, C., 349  
 Gutscher, M.-A., 35, 36, 90, 163  
 Guy, A., 171  
 Guy, B., 140  
 Guy, L., 116  
 Guyomard, A., 497-499  
 Guyoneaud, R., 431  
 Guyonnet, D., 368  
 Guyot, F., 116, 330, 335, 473
- ## H
- Hachemi, A., 460  
 Hachemi, K., 47  
 Hachour, K., 183  
 Haddam, N., 268  
 Hadjzobir, S., 172  
 Haffen, S., 304  
 Hagemann, B., 333  
 Haigis, V., 363, 366  
 Haimadi, H., 369  
 Hajjar, Z., 380  
 Hakil, F., 431  
 Hallet, V., 463, 464, 467  
 Hallot, E., 248  
 Halma, M., 400  
 Hamai, L., 29  
 Hamhami, M., 320  
 Hammed, M., 258  
 Hammor, D., 168-170  
 Hamon, K., 22, 111  
 Hamoudi, M., 453  
 Hamouta, N., 123  
 Hanot, V., 299  
 Hanquiez, V., 92, 97, 98  
 Haq, B., 71  
 Harlaux, M., 374, 377  
 Harris, L., 182, 368, 376  
 Hartley, A., 62  
 Hassan, R., 98  
 Hassanein, W., 258  
 Hassani, R., 161, 167  
 Hässig, M., 172, 173  
 Hatem, E., 69, 115

- Hauptert, I., 152, 192  
Haurine, F., 388  
Hayashi, Y., 24  
Hazemann, J.-L., 366, 471  
Heba, G., 82  
Hebbeln, D., 266  
Hébert, H., 24, 43  
Hebert, B., 102  
Hecquet, C., 36  
Heilbronn, G., 68  
Heimbürger, A., 450  
Heimbürger, L.-E., 220, 426, 429, 437, 438  
Hellal, J., 428  
Hellio, G., 57  
Hemelsdaël, R., 274  
Hemes, S., 317  
Hemmer, L., 239  
Hénon, F., 454  
Henry, B., 482  
Henry, H., 29  
Henry, P., 298, 300, 478, 486  
Hérial, G., 19, 167, 238  
Heras-Peña, M., 387  
Hermitte, D., 39  
Hernandez, B., 42, 43  
Herny, C., 55  
Hervé, G., 58  
Hervouët, Y., 61  
Hesse, B., 472  
Heuret, A., 29, 162–164, 457  
Hez, G., 276  
Hibsch, C., 356  
Hillaire-Marcel, C., 268  
Hillion, F., 474, 475  
Hintelmann, H., 437  
Hippolyte, J.-C., 39, 189, 195  
Hivert, F., 286, 456  
Ho, S., 105, 106  
Hoang, H., 314  
Hoareau, G., 61, 82, 83, 116, 118, 208, 213, 228, 234, 242, 266, 336  
Hobléa, F., 8  
Hodell, D., 269  
Höhne, N., 317  
Hollender, F., 39, 206  
Holmboe, M., 311  
Hölttä, P., 179  
Holtz, F., 361  
Holub, A., 221  
Holzhauer, J., 292, 295  
Homborg, C., 218  
Horreard, F., 474, 475  
Houben, M., 317  
Houecandé, O., 460  
Houillon, N., 466  
Houkonnou, N., 112  
Houria, A., 357, 370  
Housen, B., 242  
Houzé, C., 288  
Hsu, S., 39, 43  
Htich, A., 466  
Hu, Y., 473  
Hugot, E., 8  
Huguenot, D., 349  
Hugué, A., 265, 280–282  
Hugué, C., 279  
Hugué, L., 428  
Hugué, S., 407, 416  
Huismans, R., 211  
Hulin, C., 373  
Humbert, H., 22  
Humbert, J., 146  
Humez, P., 443, 445  
Huneau, F., 397, 449  
Hunt, D.W., 121, 212  
Hurtado, C., 205  
Hurtrez, J.-E., 10  
Husson, L., 9, 29, 145, 161, 167  
Huvelle, G., 349  
Huyghe, D., 9, 61, 76, 153, 241, 246  
Huyghe, P., 167  
Hwung, H.-H., 22
- I**  
Ianigro, J.-C., 486  
Iconaru, S.L., 400  
Idres, M., 36, 358  
Idris, A., 131  
Ikenne, M., 378  
Ilboudo, H., 355  
Ilmen, S., 358, 370, 378  
Imbert, P., 61, 89, 100, 101, 103–106, 118  
Invernizzi, C., 300  
Ionov, D., 133  
Ioualalen, M., 40  
Irving, J., 287  
Isambert, A., 252  
Isaure, M.-P., 407, 416, 474  
Islamoglu, Y., 67  
Issartel, J., 397  
Issautier, B., 83  
Ivy-Ochs, S., 276  
Izquierdo Llavall, E., 242, 243  
Izquieta, S., 222
- J**  
Jabir, A., 85  
Jackson, A., 126  
Jacob, J., 265, 279, 280, 284  
Jacquemet, N., 363, 443  
Jacques, A., 234  
Jafari-Saroughi, H., 373  
Jaffré, R., 495  
Jaillard, A., 41, 45, 46  
Jaillard, E., 258  
Jakymiw, C., 445  
Jalil, N.-E., 248  
Jallais, N., 45, 46  
Jalón Rojas, I., 23  
Jamme, F., 473  
Jammes, S., 152  
Jamoussi, F., 356  
Jannic, A., 45  
Janots, E., 339–342, 361, 395  
Janoušek, V., 171, 180  
Janowski, M., 76  
Jaqueto, P., 398  
Jardani, A., 287, 467  
Jardat, M., 314  
Jarné, V., 204  
Jassey, V., 282  
Jatiaux, R., 103  
Jault, D., 57, 127  
Jaunat, J., 449  
Jean-Soro, L., 475  
Jeanbille, M., 220  
Jeandel, C., 480  
Jeanneret, P., 339, 341  
Jébrak, M., 358, 368, 369, 371, 373, 377  
Jeffries, T., 257, 481  
Jégo, S., 172, 363  
Jenks, J., 122, 249, 260  
Jessell, M., 255  
Jestin, J., 411  
Jézéquel, D., 327  
Jézéquel, R., 421, 424  
Jiménez-Martínez, J., 288  
Jiménez-Munt, I., 200  
Jing, L.-Z., 15  
Jitaru, P., 415  
Joachimski, M., 257  
Joannes-Boyau, R., 351  
Jobard, E., 308  
John, C., 85  
Joigneaux, E., 465  
Jolivet, L., 138, 153, 168, 185, 192, 243, 369  
Jolivet, M., 68, 182, 240, 374  
Jomard, H., 34, 213  
Jomelli, V., 267, 480  
Jonchière, R., 363  
Jongmans, D., 47  
Jorry, S., 104  
Joseph, P., 82  
Joseph, Y.-F., 71  
Josnin, J.-Y., 191  
Jouanne, F., 34  
Jouannic, G., 41  
Jouet, G., 75, 89, 95, 98  
Jougnot, D., 288, 293, 295  
Joulian, C., 405, 406, 428  
Joumes, M., 93  
Jouniaux, L., 292–295  
Jourani, E., 289  
Jourde, H., 464, 467  
Jourde, K., 486  
Jourdon, A., 13, 196  
Joussain, R., 90  
Jousse, F., 459  
Joussein, E., 384, 408, 409  
Joussiaume, R., 121, 212  
Jouvin, D., 432  
Jovet, F., 274  
Juan, C., 80  
Judek, C., 41  
Juillot, F., 390  
Juliani, C., 157  
Jun, Y.-S., 473  
Justice, S., 499
- K**  
Kaegi, R., 399  
Kais, A., 202, 207  
Kalenitchenko, D., 220  
Karabulut, H., 35  
Karpoff, A.M., 146  
Kars, M., 63  
Kassem, B., 506  
Kässner, A., 201  
Katsev, S., 118  
Kaufmann, O., 463  
Kaymakci, N., 189  
Kazpard, V., 396, 414, 417  
Kear, B., 257  
Keddadouche, K., 31  
Kedziorek, M., 460  
Keir, D., 156  
Keiser, L., 261  
Kelly, T., 474  
Kergaravat, C., 82, 172, 211–214  
Kerhervé, P., 280  
Khadour, F., 313  
Khadiri Yazami, O., 289  
Khaled H., 258  
Khalifa, Z., 279  
Khanbari, K., 157  
Khatib, S., 345  
Kharadzze, G., 244  
Khodja, H., 471  
Kieffer, I., 471  
Kienast, J.-R., 170  
Kilzi, M., 129, 132  
Kinderstuth, T., 386  
Kindler, P., 92  
Kissel, C., 90, 95  
Klaver, J., 317  
Klingelhoefer, F., 76, 100, 149–151, 154–156, 161, 164  
Knoery, J., 428, 429  
Kobchenko, M., 312  
Kobeissi, A., 417  
Koffman, T., 276  
Koga, K.T., 173  
Kokh, M., 362, 366  
Kolli, O., 357  
Kolli, Z., 41  
Köng, E., 90  
Konhauser, K., 252  
Konotio, I., 84  
Korja, A., 179  
Korostelev, F., 156  
Korsakov, A., 133  
Kortebi, S., 357  
Kostadinova, D., 385  
Kourim, F., 130  
Kouzmanov, K., 362

- Kovačić, V., 350  
Kovaltsov, G., 57  
Kowalski, F., 44  
Kozovits, A., 417  
Kramar, N., 498  
Krasovec, M., 423  
Krawczyk, C., 163  
Krein, A., 19  
Kremer, T., 286  
Krim, N., 61, 118  
Kunesch, S., 94  
Kusznir, N., 152, 229  
Kutterolf, S., 389  
Kwasniewski, A., 122
- L**  
Labadie, P., 437  
Labails, C., 149  
Labasque, T., 449  
Labat, D., 454  
Labat, N., 326  
Labatut, M., 450  
Labaume, P., 217, 227, 228, 230, 234, 237, 238, 240  
Labeyrie, B., 386  
Labille, J., 397, 399, 400, 473  
Labrousse, L., 178, 179, 185, 481-483  
Lacan, F., 437, 450  
Lacazedieu, A., 507  
Lach, A., 442, 444  
Lacombe, O., 191, 192, 196, 208, 241  
Lacoux, J., 407  
Lacquement, F., 493  
Lacroix, B., 157, 208, 217, 234, 380  
Ladant, J.-B., 257, 259, 272  
Ladouche, B., 465  
Lafarge, A., 346  
Lafay, R., 146, 395, 445  
Laffay, M., 72  
Laffont, L., 429, 434, 438  
Lafforgue, L., 372  
Laflaive, J., 398  
Lafortune, S., 51, 326, 327, 329, 330  
Lafosse, M., 35, 80, 192, 197  
Lafrance, S., 377  
Lagabrielle, Y., 227-230, 238  
Lagane, C., 14, 429, 438  
Lagarde, P., 472  
Laggoun, F., 282  
Lagier, L., 416  
Lagnaoui, A., 84  
Lagneau, A., 349  
Lagneau, V., 443  
Lagny, C., 51, 329  
Lagraa, K., 355  
Lague, D., 16  
Lahaie, F., 327  
Lahcen, D., 390  
Lahera, E., 471  
Lahfid, A., 208, 217, 227, 228, 233, 234, 237, 240, 243, 406  
Lahondère, D., 129  
Laibi, R., 112  
Laigle, M., 160, 164  
Lainé, M., 386  
Lajeunesse, P., 13  
Lalanne, A., 496  
Lallemant, S., 39, 43, 164, 513  
Lallier, F., 274  
Lalonde, S., 252, 255  
Lamarche, J., 206, 463  
Lamarque, G., 480, 482  
Lambert, A., 109  
Lamy, A., 398  
Lan Ho, T., 103  
Lanari, P., 170, 171, 196, 217  
Lanceleur, L., 428, 431, 437  
Landrein, P., 262, 308  
Lange, B., 415  
Langlade, J., 375  
Lanos, P., 58  
Lansalot, M., 385  
Lansigu, C., 497, 498, 500  
Lanson, B., 217  
Lanson, M., 361  
Lanteaume, C., 123  
Lanteri, S., 503, 504  
Lanzanova, A., 450  
Lapanje, A., 492  
Laperche, V., 428  
Laplanche, C., 415  
Lardeaux, J.-M., 162, 177, 181, 182, 491, 492  
Larin, N., 334  
Larose, C., 438  
Larose, E., 488  
Larrasoña, J.J., 243  
Larroque, C., 29, 30, 34, 40, 155  
Larroque, F., 454  
Lartaud, F., 93  
Lartiges, B., 396, 414, 417  
Laryea, W., 112  
Lasheras, E., 222, 223  
Lassalle, B., 472  
Lasserre, B., 386  
Lasseur, E., 60, 62, 70, 83, 121, 234, 304, 307  
Lassin, A., 442, 444  
Lastennet, R., 466  
Lastras, G., 88  
Latour, S., 486  
Latrille, C., 386  
Lauer, B., 212  
Lauga, B., 404  
Laugié, M., 49  
Laumonier, M., 138  
Launeau, P., 49  
Laurencin, M., 161, 164  
Laurendeau, A., 43  
Laurent, A., 342  
Laurent, J.-P., 386  
Laurent, O., 141, 177, 180  
Laurent, V., 138  
Laurich, B., 317  
Lavé, J., 16, 212, 267, 269, 275  
Lavielle, B., 448  
Lavina, P., 41, 45, 46  
Lays, P., 153  
Lazaro Roche, I., 286, 456  
Laziz, O., 31  
Lazzaro, X., 426  
Lazzeri, M., 388  
Le Bayon, B., 183, 187, 493, 500  
Le Bec, T., 426  
Le Borgne, T., 288  
Le Bourdonnec, F.-X., 351  
Le Bris, N., 93  
Le Caer, S., 386  
Le Casio, M., 496  
Le Coustumer, P., 397, 400, 411, 449  
Le Coz-Bouhnik, M., 411  
Le Dantec, N., 22, 111  
Le Derf, F., 422  
Le Faou, Y., 95  
Le Forestier, L., 385, 411  
Le Gal, V., 205  
Le Gall, B., 23, 136, 144  
Le Gall, C., 506  
Le Goff, J., 82  
Le Gouche, C., 71  
Le Guer, Y., 139  
Le Guern, P., 292  
Le Hecho, I., 407  
Le Hir, G., 254, 257, 260, 266  
Le Lous M., 454  
Le Mesnil, M., 464  
Le Meur, M., 396, 401  
Le Mignot, E., 354  
Le Mouélic, S., 54, 55  
Le Pape, P., 396  
Le Pourhiet, L., 192, 197, 237  
Le Romancer, M., 138, 480  
Le Roux, C., 388  
Le Roux, G., 220, 221, 224, 225, 270, 438  
Le Roux, O., 288, 328  
Le Roux-Mallouf, R., 22, 31  
Le Roy, P., 22, 213  
Lea, V., 347  
Leanni, L., 75, 167  
Lebatard, A.-E., 345  
Lebeau, T., 409, 414  
Lebedel, V., 258  
Leblond, S., 224  
Lebon, A., 68  
Lebourg, T., 17, 34, 40, 236  
Lebrec, U., 107  
Lebrun, J.-F., 162, 164, 457  
Leccia, O., 457  
Lecoq, N., 464, 467  
Lecroart, P., 118  
Leduc, A., 69  
Lefebvre, J.-P., 112  
Lefebvre, S., 69  
Lefevre, M., 298, 300, 486  
Lefrançois, R., 358  
Legal, S., 497  
Legéay, A., 426, 434  
Legéay, E., 172, 211  
Legendre, L., 36  
Legendre, T., 41  
Legros, H., 375  
Lehembre, F., 406  
Lehmann, F., 294  
Lehu, R., 39, 43  
Leleu, S., 62, 122  
Leleu, T., 283  
Leloup, P.-H., 194, 493  
Leloup-Besson, A., 274  
Lemilbeau, C., 265, 280, 282, 284, 405  
Lemoine, A., 24  
Lemonnier, N., 483  
Lens, P., 434  
Léonardi, V., 467  
Léonide, P., 92, 463  
Leparmentier, F., 77, 90, 95, 150  
Lepot, K., 252  
Leprêtre, A., 150, 155, 156  
Leprêtre, R., 372  
Lerat, J., 84  
Lerat, M., 84  
Lerouge, C., 334  
Leroux, E., 60, 75, 79, 149, 154, 155  
Leroux, F., 385  
Leroy, S., 154, 156, 164, 165  
Leroy, Y.-M., 204  
Lescure, T., 405  
Lespes, G., 400  
Léticée, J.-L., 162  
Letouzey, J., 206  
Leuthold, J., 135  
Levaché, D., 103  
Levard, C., 397, 471, 473  
Leveque, T., 416  
Levitz, P., 312  
Levresse G., 365  
Lexa, O., 171  
Leynet, A., 103  
Leyreloup, A., 184  
Leyrit, H., 41, 45, 46  
Lezin, C., 258, 261, 262  
Li, H., 68, 418  
Li, P., 428  
Li, Q., 473  
Li, Y., 15  
Licari, L., 268  
Liégeois, J.-P., 356  
Liesa, C., 320

- Liesa, M., 181, 186, 187  
Lima, L., 427  
Lima, M., 386  
Lin, A., 43  
Lincot, A., 126  
Linde, N., 288, 293  
Lindhorst, J., 377, 381  
Lions, J., 327, 442, 443, 445  
Liou, J.-Y., 22  
Liu, H., 174  
Liu, W., 471  
Livermore, P., 57  
Livet, M., 23  
Llaurens, G., 178  
Llopart, J., 100  
Llorens, I., 471  
Llubes, M., 350  
Lo, K., 130, 141  
Lobjoie, C., 180  
Locke, R., 448  
Loevenbruck, A., 24, 43  
Lofi, J., 94, 149, 150  
Loget, N., 8, 76  
Loisy, C., 82, 85, 288, 328  
Lombo Tombo, S., 96  
Lompo, M., 355  
Loncke, L., 94, 103, 155  
Londeix, L., 261  
Looms, M., 293  
Loosli, F., 399  
Lopes, F., 254, 294  
López Julián, P., 320  
López-Blanco, M., 83  
Lopez Galindo, A., 387  
Lopez, M., 70, 96, 102, 380  
Loquet, M., 69  
Lorand, J.-P., 129  
Lorgeoux, C., 401  
Losno, R., 450  
Lotout, C., 183  
Louati, H., 421  
Louden, K., 154  
Loumi, K., 123  
Loureiro, A., 100, 151, 157  
Loury, C., 170, 171, 173  
Louterbach, M., 77, 201  
Louvat, P., 432  
Lucas, A., 53  
Lucas, M., 499  
Lucazeau, F., 164  
Lucchi, R., 100  
Lugliè, C., 351  
Lupker, M., 275  
Lutz, P., 23, 41, 45, 46, 289  
Luzón, A., 276  
Lymer, G., 149, 150  
Lyonnais, F., 492
- M**  
Maacha, L., 131, 365, 370, 376, 379  
Macary, O., 24  
Macault, R., 304  
Macdonald, J., 85  
Machane, D., 31  
Mache, J., 384  
Macouin, M., 253, 398  
Madariaga, J.M., 220  
Magand, O., 427  
Magot, M., 422  
Magott, R., 377  
Mahabot, M., 110  
Mahéo, G., 194  
Mahieux, G., 72, 73, 107  
Mahjoubi, E., 377  
Maia, M., 478  
Maillard, A., 149, 150, 155, 261  
Maillet, M., 72  
Maillot, B., 204, 207  
Maineult, A., 286, 294  
Majule, A., 280  
Makhloufi, Y., 307  
Makou, M., 283  
Malandrino, M., 408  
Malartre, F., 234, 274  
Malatesta, L., 16  
Malaval, M., 121, 212  
Malavieille, J., 18, 34, 207  
Malherbe, J., 474, 475  
Malié, P., 72, 107  
Manatschal, G., 144, 146, 152, 157, 186, 192, 229  
Manceau, C., 67  
Manceau, J.-C., 334  
Manchuel, K., 43  
Mangeolle, L., 506  
Manighetti, I., 18, 34  
Mannai, I., 66  
Mannani, I., 64  
Mansour, H., 456  
Mansuy-Huault, L., 401  
Mantenant, J., 350  
Mantoy, T., 356  
Manzotti, P., 191, 195  
Maquaire, O., 40, 49  
Marafatto, F., 401  
Marang, L., 416  
Marblé, A., 326  
Marc, S., 211, 492  
Marcaillou, B., 155, 161, 162, 164, 457  
Marcel, C., 506  
Marcer, R., 24  
Marcoux, E., 362, 369  
Maréchal, A., 30, 31  
Marechal, J.-C., 465  
Margalef Porcar, A., 187, 188  
Margerin, L., 54, 126, 245  
Marie, B., 427  
Marieu, V., 109–111  
Marignac, C., 356, 374, 375, 377  
Marín, R., 243  
Marin, B., 407  
Marin, L., 427  
Marin, S., 43  
Marin-Carbonne, J., 252  
Marié, L., 309  
Markelova, E., 405  
Marlin, C., 290  
Maron, P., 109  
Marquer, D., 180, 218, 266, 341, 374, 493  
Marry, V., 311, 314  
Marsan, D., 34  
Marsset, B., 104  
Marsset, T., 104  
Marteau, J., 486  
Martelet, G., 188  
Marthaler, M., 498  
Martigny, G., 497  
Martillo, C., 69  
Martin, E., 196  
Martin, F., 384, 388  
Martin, H., 136  
Martin, J., 221  
Martin, L., 267, 269, 275  
Martin, P.-Y., 427  
Martin, S., 404, 498  
Martin, X., 286, 456  
Martin-Martin, J.D., 121, 212  
Martinez, E., 199  
Martinez, I., 330  
Martinez, J.-M., 50, 54  
Martinez, M., 116, 212, 259  
Martinez, P., 90, 93, 95, 261, 266  
Martinez, R., 410  
Martini, A., 492  
Martinod, J., 14, 29, 167, 238  
Martins, J., 398, 406, 415, 459  
Martos, R., 150  
Martín-Closas, C., 187  
Maruszczak, N., 222, 435  
Mary, B., 204  
Mary, F., 101  
Masbou, J., 429, 438  
Masini, E., 151, 237  
Masion, A., 397  
Maspatud, A., 24, 46  
Masrouhi, A.F., 205  
Masrour, M., 258  
Masrouri, F., 317  
Massa, C., 279  
Massat, L., 317  
Massei, N., 467  
Masson, F., 144, 509  
Massé, M., 55  
Masure, E., 249  
Materum, R., 397  
Mathieu, L., 138  
Mathieu, O., 260  
Mathon, D., 41  
Mathé, P., 287  
Matias, L., 149, 151, 154, 155, 157  
Matonti, C., 298  
Mattielli, N., 270  
Mattioli, E., 248, 279  
Maubec, N., 411  
Mauffrey, M.-A., 89, 95, 98  
Maurice, C., 433  
Maurice, L., 434  
Maurizot, P., 26, 27  
Maury, A., 408  
Maury, R., 147  
Maury-Brachet, R., 426, 434  
Mavromatis, V., 433  
May, P., 442  
Mayen, J.-F., 405  
Mayer, A., 449  
Mazabraud, Y., 162, 457  
Mazier, F., 224, 225  
Mazières, A., 96, 97  
Mazuyer, A., 84, 303  
Mazza, A., 509  
Mazzilli, N., 464  
Mazzotti, S., 30, 31  
McGenity, T., 424  
McIntyre, C., 283  
Medynski, S., 146  
Megherbi, S., 183  
Mehdi, K., 154  
Méheust, Y., 288  
Méheut, M., 388, 434  
Mehl, C., 233, 308  
Mehrkian, K., 83  
Mekkaoui, A., 66, 140  
Melekhova, E., 135  
Melinte-Dobrinescu, M., 60, 79, 80  
Melki, F., 65  
Melleton, J., 181  
Menand, T., 140, 141  
Menant, A., 168, 369  
Ménard, G., 8, 30, 191  
Mench, M., 411  
Menendez, B., 307  
Ménez, B., 116, 336, 473  
Ménot, G., 281  
Ménot, R.-P., 480, 482  
Mercadier, J., 353, 374, 375, 377  
Mercerat, E., 503  
Mercier De Lépinay, B., 35, 36, 155, 160, 164, 165  
Mercier, E., 202, 207  
Mercier, J.-L., 113  
Mercier, M., 137  
Meresse, F., 144, 240  
Mériaud, N., 371  
Merkel, S., 126  
Merkulova, M., 131  
Merlet-Machour, N., 422  
Merzeraud, G., 80  
Meslough, S., 254  
Messenger, G., 39, 61, 121, 212  
Meule, S., 22  
Meyer, B., 164, 165  
Meyer, C.-L., 416  
Meynadier, L., 267  
Mezon, C., 293

- Mezri, L., 157  
 Michel, E., 480  
 Michel, F., 473  
 Michel, K., 326  
 Michot, L., 396  
 Michotey, V., 421  
 Micoud, P., 388  
 Miegebielle, V., 103  
 Migeon, S., 91, 101, 155  
 Mihoubi, A., 149  
 Mikelic, A., 312  
 Milesi, V., 335  
 Milhomem, J., 253  
 Milton, C., 421, 423  
 Millan, C., 389  
 Miller, J., 359  
 Millot, R., 361, 450  
 Milot, J., 347  
 Minoletti, F., 265  
 Minster, J.-F., 513  
 Miradji, M., 95  
 Miralles, S., 126  
 Miras, Y., 13  
 Miska, S., 432  
 Missamou, T., 109  
 Missenard, Y., 218, 372  
 Mitchell, E., 282  
 Mizrahi, M., 388  
 Mochales, T., 243  
 Mocochain, L., 8, 10, 65, 67  
 Moëlo, Y., 375  
 Mohamed, A., 202, 207  
 Mohamed, K., 156  
 Mohn, G., 151, 152, 157, 172, 186, 192  
 Moignard, A., 454  
 Moine, B., 133, 480, 483  
 Molinari, F., 492  
 Moller, C., 506  
 Mollex, G., 135  
 Molli, G., 34  
 Mollier-Vogel, E., 266  
 Molliex, S., 23, 75  
 Mombo, S., 398, 415, 416, 418  
 Momtbrun, M., 459  
 Monfret, T., 478  
 Monges, C., 205  
 Monin, N., 8  
 Monié, P., 169, 174, 182, 217, 238  
 Monnier, A., 43  
 Monnier, C., 129, 169  
 Monnier, D., 106  
 Monnier, L., 139  
 Monnin, C., 116, 242, 336, 443  
 Monod, B., 26, 238, 456, 500  
 Monperrus, M., 423, 427, 428  
 Montagna, P., 266  
 Montargès-Pelletier, E., 396, 401, 432  
 Montel, F., 311  
 Montel, J.-M., 511  
 Montero-Serrano, J.-C., 272  
 Montes-Hernandez, G., 146, 395, 396, 445  
 Montluçon, D., 283  
 Montouillout, V., 444  
 Moonen, P., 475  
 Moragas, M., 212  
 Moreau, J., 75  
 Morel, L., 244  
 Moreno, E., 90, 95  
 Moretti, I., 119, 203, 206  
 Morichon, D., 24, 109, 110, 112, 503  
 Morin, G., 432  
 Morvan, X., 407  
 Moser, E., 281  
 Mosselmans, F., 406  
 Mosser-Ruck, R., 84, 372  
 Motelica-Heino, M., 224, 397, 400, 408, 411  
 Mouchene, M., 236  
 Mouhadjir, M., 373  
 Mouillard, P., 147  
 Moukhsil, A., 368  
 Moulin, M., 75, 76, 79, 100, 149, 151, 154-157  
 Moulouel, H., 31  
 Mouly, B., 144  
 Mouly, E., 42  
 Mouralis, D., 346  
 Mourau, F., 507  
 Mourgues, R., 102, 105  
 Moussaoui, S., 49  
 Moussard, H., 220  
 Moussirou, B., 238  
 Mousty, C., 400  
 Moutaqi, A., 361  
 Mouthereau, F., 8, 192, 196, 231, 233, 236, 237, 241, 246, 482  
 Moutte, J., 460  
 Moyen, J.-F., 177, 180  
 Moyne, C., 313  
 Mroueh, H., 320  
 Mucci, A., 118  
 Mudlappa, J., 78  
 Mudry, J., 18, 466  
 Mugnier, J.-L., 167  
 Mulder, T., 92, 93, 97, 98, 261  
 Müller, C., 8, 65, 67  
 Muller, E., 252  
 Munch, P., 80, 162, 182, 217  
 Muñoz, J.A., 186, 231  
 Munoz, M., 131, 217, 348, 350, 361, 379, 414  
 Munzi, P., 58  
 Murat, A., 102  
 Muska, K., 82  
 Mutti, M., 117  
 Naba, S., 255, 359  
 Nahon, A., 109  
 Nakamura, M., 139  
 Nalpas, T., 153, 214, 215, 228  
 Nardin, E., 68, 248  
 Nartea, C., 53  
 Nascimento, D., 389  
 Navarro, E., 220  
 Navel, A., 398, 406, 415, 459  
 Navidad, M., 181, 186, 187  
 Ndam Ngoupayou, J.-R., 17  
 Ndiaye, I., 380  
 Nechtschein, S., 39  
 Nédélec, A., 139, 255  
 Negrel, P., 270, 362, 371, 443, 450  
 Negri, A., 67  
 Nelis, A., 340  
 Nexer, M., 9  
 Ngombi Mavoungou, L., 239, 240  
 Nguyen, H. L., 503  
 Nguyen, K., 46  
 Niang, M., 41  
 Nicogossian, D., 41  
 Nicol, A., 72  
 Nicolas, A., 303  
 Nicolas, J., 244  
 Nicoli, G., 177  
 Nicollet, C., 173  
 Nirrengarten, M., 152  
 Nitsch, E., 492  
 Nivière, B., 9, 39, 61, 199, 202  
 Njoya, A., 384, 390  
 Nkalih, A., 384, 390  
 Nodet, M., 503  
 Noël, H., 411, 455  
 Nogueira, A., 253  
 Noir, J., 126  
 Noirez, S., 288, 328  
 Noirielle, C., 283, 292  
 Nonnotte, P., 147  
 Normandin, C., 90  
 Normandin, E., 295  
 Nouacer, H.-A., 47  
 Nouzé, H., 154, 155  
 Nowack, B., 404  
 Nowak, S., 408  
 Ntungwanayo, J., 365  
 Nugue, N., 499  
 Nussbaum, C., 207  
 Ohnenstetter, M., 180  
 Okey, T., 112  
 Oleinikov, O.b., 133  
 Oliot, E., 152, 157, 174, 181, 218  
 Oliva, P., 414, 416  
 Oliva-Urcia, B., 242, 243, 300  
 Olivares, S., 427  
 Oliveira, D., 269  
 Olivetti, V., 13  
 Olivier, N., 122, 249, 260  
 Oliván, C., 243  
 Ollivier, P., 399, 400  
 Olu, K., 91  
 Omuombo, C., 282  
 Ona-Nguema, G., 473  
 Oncken, O., 163  
 Orange, M., 351  
 Orberger, B., 70  
 O'Reilly, S.Y., 480  
 Orgogozo, L., 416, 454  
 Oriekhova, O., 401  
 Ortega, C., 69, 234  
 Ortelli, M., 362  
 Osacar, C., 300  
 Oth, A., 19  
 Ott D'Estevou, P., 242  
 Ottavi-Pupier, E., 139  
 Quadfeul, S., 86, 286, 289, 488  
 Ouali, A., 387  
 Ouali, J., 199  
 Oualimehadji, A., 66  
 Ouanhnon, L., 241  
 Ouazzani, L., 356, 361  
 Ouchtouban, L., 356, 361  
 Ouedraogo, M., 290  
 Ouellet-Bernier, M.-M., 268  
 Ouyi, P., 359  
 Ouodiouma, K., 204  
 Outhounjite, S., 373  
 Ouvrard, G., 383  
 Ouzegane, K., 170  
 Ozer, A., 47  
 Pabian, C., 79  
 Pabian-Goyheneche, C., 79  
 Pace, A., 122  
 Pace, B., 31  
 Pack, A., 135, 146  
 Pacot, R., 44  
 Pacton, M., 115, 117, 283  
 Pagano, M., 113  
 Pagel, M., 371  
 Paillou, P., 49, 53  
 Palis, E., 34, 40, 45, 236  
 Pambo, F., 70  
 Pamer, R., 492  
 Panfilov, M., 333, 334  
 Panfilova, I., 292  
 Pannier, F., 407  
 Pantaloni, M., 492  
 Obliger, A., 314  
 Odemar Science Team, 145  
 Odonne, F., 100, 101, 106, 116, 242, 261  
 Oesterling, N., 492  
 Oger, P., 431  
 Oggian, G., 20  
 Ohnenstetter, D., 368

- Pantel, M., 83  
Panza, F., 224  
Paquet, F., 60, 69, 70, 213  
Paquette, J.-L., 180, 237, 252, 339, 356  
Parat, C., 460  
Parat, F., 135, 137  
Pares, J., 243  
Paris, M., 385  
Parisot, J.-C., 39, 287  
Parquer, M., 84  
Parra, F., 77  
Parsons, C.T., 405  
Pascaud, F., 512  
Pascaud, G., 409  
Pasini, V., 473  
Pastier, A.-M., 9  
Pastore, N., 487  
Pathier, E., 34  
Paul, A., 193, 235  
Pauwels, H., 411, 465  
Pavon-Carrasco, F., 58  
Payo Payo, M., 88  
Payri, C., 336  
Péchevran, C., 221  
Pecoits, E., 252  
Pedersen, H., 478  
Pedoja, K., 9, 29  
Pedrero Zayas, Z., 426-428  
Pedreros, R., 24  
Pedrot, M., 404  
Peiffert, C., 363  
Peillod, A., 157  
Peix, M., 95  
Péllissié, T., 500, 501  
Pellen, R., 75, 79  
Pellenard, P., 259, 262  
Pellenq, R., 311, 317  
Pellerin, J., 454  
Pelleter, A., 137  
Pelleter, E., 361  
Pelletier, B., 167, 336  
Pelletier, M., 317  
Pelliza, H., 205  
Peña, J., 395, 401, 409, 410  
Penen, F., 474  
Penn, R., 395  
Pereira, A., 252, 254  
Pereira, J.-M., 303  
Pérez Benedicto, J., 320  
Pérez, A., 276  
Pérez-Huerta, A., 481  
Perez, A., 349, 475  
Perfettini, H., 34  
Perineau-Barbel, A., 466  
Perret, A., 498  
Perri, F., 11  
Perrier, L., 315  
Perrin, J., 188, 463, 471  
Perrot, J., 156  
Perrouy, S., 238  
Peru, E., 93  
Perugini, D., 139  
Pesch, R., 224  
Pessel, M., 288, 290  
Petelet-Giraud, E., 450  
Petersen, J., 194  
Petit, C., 13, 29, 194, 196  
Petit, S., 102, 383  
Petitjean, L., 22  
Petitjean, P., 411  
Pétri, B., 152, 157, 186  
Petrunin, A., 163  
Pettke, T., 340, 341  
Peyraube, N., 397, 455  
Peyret, M., 31  
Peyronel, O., 10  
Peyrusse, F., 503  
Pfleiderer, S., 492  
Phalyvong, K., 408  
Philippe, E., 407  
Philippot, P., 252, 254  
Photiades, A., 174, 381  
Piboule, M., 346  
Piccin, A., 492  
Pichat, A., 82, 84, 211, 213  
Pichavant, M., 132, 136, 138, 141, 334, 336, 361, 363  
Pichot, T., 144, 164  
Pickford, M., 77  
Picot-Colbeaux, G., 443  
Pienitz, R., 433, 437  
Pierart, A., 414, 418  
Pierre, C., 105  
Pierret, M.-C., 13  
Piete, H., 164  
Pigot, L., 85, 122  
Pijaudier-Cabot, G., 313, 315, 475  
Pik, R., 146, 154, 191, 192, 231, 233, 237  
Pillot, D., 366  
Pinaly, H., 222, 224  
Pinard, H., 34  
Pinet, S., 50  
Pinguet, R., 109  
Pinheiro, J., 460  
Pinna, R., 231  
Pinna-Jamme, R., 16  
Pinquier, Y., 330  
Pinto, L., 19  
Piromallo, C., 163  
Pironon, J., 84, 230  
Pisapia, C., 473  
Piscoya, R., 50  
Pistre, S., 452  
Pitra, P., 183  
Pittet, B., 194, 279  
Planavsky, N., 252  
Planchon, M., 368  
Plancq, J., 279  
Plantier, F., 315  
Plateaux, R., 194  
Plissart, G., 169  
Plisson-Chastang, C., 396  
Po Wong, F., 144  
Pochat, S., 53, 55  
Pocoví Juan, A., 243, 276, 320  
Pohl, A., 257  
Poilvet, J.-C., 218  
Point, D., 414, 426, 429, 438  
Poisson, A., 67  
Poitevin, C., 237  
Poitrasson, F., 431, 435  
Pokrovski, G., 362, 363, 366  
Pokrovsky, O., 220, 398, 431, 433, 454  
Pokryszka, Z., 326, 327, 329, 330  
Pons-Branchu, E., 9  
Ponte, J.-P., 92, 104  
Ponthieu, M., 407  
Ponthus, L., 16, 138, 174  
Poort, J., 75, 79  
Popescu, S.-M., 60, 79, 236, 481-483  
Popov, E., 261  
Poprawski, Y., 232  
Portet-Koltalo, F., 422  
Portier, E., 122  
Postec, A., 336  
Potdevin, J.-L., 115, 242  
Potel, S., 72, 342  
Pothin, V., 49  
Potin-Gautier, M., 400  
Poujol, A., 31  
Poujol, M., 183, 195, 228, 229, 248, 341, 353, 374  
Poulain, A., 395, 464, 467  
Poulin, C., 452  
Poupeau, G., 351  
Pourcelot, L., 224, 225  
Pourret, O., 342, 368, 410, 415  
Pousse, L., 34  
Pouyet, E., 472  
Poydenot, V., 308, 487  
Pozzi, J.-P., 63  
Pradas, A., 399  
Pradoux, C., 450  
Praeg, D., 101  
Predoi, D., 400  
Prélot, B., 294, 318  
Premaillon, M., 267, 269  
Prépetit, C., 71  
Presti, D., 163  
Preud'homme, H., 421  
Prevost, M., 228, 239  
Prévot, F., 327  
Prevot, G., 506  
Prevot, V., 385, 400  
Principaud, M., 92, 97  
Pringault, O., 421  
Prinzhofer, A., 334, 335, 366  
Priou, M., 284  
Probst, A., 221, 225  
Probst, J.-L., 438  
Prodan, A.M., 400  
Prognon, C., 26, 27  
Proietti, A., 474  
Prokushkin, A., 433  
Prosa, T., 474  
Proudhon, B., 242  
Proust, J.-N., 67, 69, 214  
Prouteau, G., 137  
Proux, O., 432, 471, 474  
Provitolo, D., 17  
Prunier, C., 22, 164, 213  
Prunier, J., 13  
Pruski, A., 91, 280, 281  
Pryet, A., 452, 453, 457  
Pubellier, M., 144, 205  
Pucéat, E., 259, 261  
Pueyo, E.L., 232, 242, 243, 276  
Pueyo, O., 243, 320  
Puig, J.-N., 505, 508, 509  
Puig, P., 88  
Pujol, M., 311  
Putnam, A., 276
- ## Q
- Qasim, B., 408  
Quang Vong, C., 443  
Quantin, C., 408, 432  
Queffelec, A., 347  
Quéméneur, M., 336  
Quesnel, B., 171  
Quesnel, F., 26, 27, 60, 265, 280, 284  
Queyron, M., 408  
Quillevere, F., 80  
Quinn, P., 406  
Quintard, M., 333, 454  
Quirt, D., 339, 341  
Quispe, A., 201  
Quitte, G., 431
- ## R
- Rabaute, A., 35, 80, 101  
Rabillard, A., 138  
Rabin, M., 18, 180, 184, 195  
Rabineau, M., 60, 75, 76, 79, 88, 100, 149, 154, 155  
Rabouille, C., 91, 280, 281  
Rachel, P., 95  
Racine, C., 90  
Rad, S., 371  
Radakovitch, O., 399, 449  
Radnaoui, A., 379  
Radu, I., 133  
Rafeh, F., 320  
Raimbault, C., 23  
Raimbourg, H., 161, 299  
Ramadan, G., 320  
Ramajo Cordero, J., 243  
Rambourg, D., 491, 492  
Ramboz, C., 161, 356, 363  
Rämö, O., 179  
Ramonet, M., 427  
Ramón, J., 232  
Ranchou-Peyruse, A., 422  
Randla, M., 94  
Raout, P., 495  
Rapinat, L., 97

- Rasoulzadeh, M., 292, 333, 334  
Ratié, G., 432  
Ratschbacher, L., 201  
Ratzov, G., 39, 43  
Raulin, C., 64  
Raynal, J.-P., 346  
Raynaud, C., 224  
Razafitianamaharavo, A., 383  
Razin, P., 83, 121, 212, 234  
Rebeix, R., 448  
Rebesco, M., 100  
Rebour, V., 24  
Recham, N., 335  
Reddad, H., 11, 271  
Redfern, J., 84  
Redjehimi, H., 119  
Redon, P.-O., 416  
Refregiers, M., 473  
Regard, V., 9, 14, 17, 19, 23, 26, 29, 39, 167, 202, 235, 238, 244  
Regnault, O., 386  
Regnault, Q., 242  
Regnet, J.-B., 303, 307  
Régnier, M., 30, 167  
Regnier, J.-L., 184  
Regnoul, J.-M., 369  
Reichert, C., 76, 154  
Reijmer, J., 93  
Reimann, T., 16  
Reinhard, D., 474  
Reisberg, L., 354  
Reitenbach, V., 333  
Remacha, E., 235  
Remaci-Benaouda, N., 140  
Remini, B., 460  
Remy, D., 238  
Ren, Y., 156  
Ren, Z., 15, 404  
Renard, A., 438  
Renard, F., 217, 312, 396, 445, 488  
Renaudié, B., 293  
Renedo Elizalde, M., 426  
Renon, N., 454  
Replumaz, A., 167  
Requejo, F.G., 388  
Respaut, J.-P., 178  
Ressouche, J., 78  
Rétif, F., 39  
Reuschlé, T., 293  
Revel, M., 13, 194, 268  
Reverman, R., 15  
Reverso-Peila, A., 181  
Revil, A., 286, 287, 313, 423  
Revillon, S., 65  
Rey, P., 178  
Rey, V., 22, 109, 113  
Rhenals Garrido, D., 330  
Riazanoff, S., 50  
Ribes, C., 67, 82, 211–214  
Ribot, F., 79  
Riboulleau, A., 118, 279  
Riboulot, V., 101, 106  
Ricard, Y., 505  
Ricchiuto, M., 24  
Ricci, T., 293  
Richard, A., 375  
Richard, H., 282  
Richard, J., 217  
Richard, L., 335  
Richaume-Jollion, A., 398  
Richert, J.-P., 507  
Rico, C., 350  
Ricordel-Prognon, C., 27  
Riera, R., 107  
Rieser, U., 16  
Righini, R., 386  
Rigo, A., 236, 244  
Rigollet, C., 270, 307  
Rigoti, C., 100, 151, 156  
Rillard, J., 288, 328  
Rinaldo, R., 434  
Ringenbach, J.-C., 39, 82, 84, 151, 153, 172, 199–202, 205, 211–214, 228  
Rinnert, E., 375  
Riotte, J., 17  
Riquelme, R., 14, 19, 167  
Ritz, J.-F., 30, 31  
Rivard, C., 472  
Rivenq, R., 475  
Rizza, M., 36  
Rman, N., 492  
Robert, A., 63  
Robert, B., 254  
Robert, E., 258  
Robert, J.-F., 228  
Robert, J.-L., 386, 389, 390  
Robert, X., 167  
Robin, A.-K., 346  
Robin, C., 17, 26, 60, 62, 68, 70, 71, 75–77, 92, 153, 211, 234  
Robin, M., 49  
Robin, N., 111  
Robin, V., 386  
Robion, P., 228, 303, 305, 307, 308  
Roca, E., 150, 231  
Roche, V., 218  
Rocher, M., 218  
Rochette, P., 191, 345, 471  
Rochez, G., 467  
Roddaz, M., 61, 77, 78, 200, 201, 206  
Rodrigues, S., 70  
Rodrigues, T., 265, 269  
Rodríguez, M., 15  
Rodríguez, S., 53, 55  
Rodríguez-Iruretagoiena, A., 220  
Rodríguez Pintó, A., 243  
Rodríguez-Méndez, L., 233  
Roessinger, J., 178  
Roest, W., 155  
Roger, D., 407  
Roger, F., 178  
Rogov, M., 261  
Rohmer, J., 443  
Roige, M., 235  
Rojas, R., 122  
Roland, B., 284  
Rolandone, F., 156, 164, 165  
Rolland, Y., 13, 170–173, 181, 191, 192, 194–196, 482  
Rollat, A., 368  
Rollet, A.-L., 444  
Rollion-Bard, C., 117, 252  
Rols, J.-L., 220, 398  
Romagny, A., 182, 217  
Román-Berdiel, T., 243, 300  
Romeuf, N., 506  
Rommevaux-Jestin, C., 283  
Rongier, G., 464  
Roque, C., 94  
Roques, D., 179, 182, 253  
Rose, J., 397, 471, 473  
Rosell-Melé, A., 279  
Rosenberg, C., 185, 196, 233  
Rossano, S., 349, 475  
Rossel, K., 15, 19  
Rossi, M., 195, 356, 373  
Rossi, P., 180, 188  
Rossignol, C., 248  
Rossignol, L., 89, 265  
Rossignol, S., 384  
Rosso, K., 395  
Rosso, V., 61  
Rostek, F., 281  
Rotaru, M., 495  
Rotenberg, B., 311, 314  
Rottier, B., 362  
Rouai, M., 287  
Roubinet, D., 287  
Rouby, D., 9, 63, 76, 78, 153, 211  
Rouchon, V., 288, 328, 330  
Rouchy, J.-M., 82, 213  
Roudil, P., 43, 512  
Roué, J., 23  
Rougier, G., 113, 239, 240  
Roure, F., 208  
Rousse, C., 350  
Rousse, S., 167, 253, 255, 350, 398  
Rousseau, D.-D., 478  
Rousseau, T., 78, 450  
Rousselle, G., 265, 269  
Rousset, D., 164, 486  
Roussey, A., 96  
Roux, L., 132  
Roux, P., 486, 487  
Rouxel, O., 432  
Rowland, D., 442  
Roy, D., 472  
Rozuel, E., 428  
Rubatto, D., 342  
Rubi, R., 212  
Rubino, J.-L., 60, 75, 79, 82, 85, 91, 193, 234, 261  
Rudmann, M., 248  
Rudnitzki, I., 253  
Ruffet, G., 183  
Ruiz, M., 235  
Ruiz-Constán, A., 155  
Rupf, I., 492  
Rupin, M., 487  
Ruz, M.-H., 46  
**S**  
Saad, I., 144  
Sabatier, F., 22  
Sabatier, P., 274  
Sabil, N., 8, 191  
Sabine, M., 90  
Sabir, M., 418  
Sabir, S., 260  
Sabri, A., 202, 207  
Sabrier, R., 496  
Sachpazi, M., 160  
Sadaoui, M., 117  
Sadiqqi, O., 372  
Sage, F., 30, 149, 150, 155  
Sahabi, M., 76, 154  
Saiag, J., 307  
Said, A., 199  
Sailhac, P., 294  
Saillard, M., 13  
Saillet, E., 299  
Saint-Bézar, B., 372  
Saint-Carlier, D., 10, 16, 212  
Sainte-Marie, J., 504  
Saintenoy, A., 486  
Saitta, A.M., 363, 366  
Sakic, P., 164, 195  
Salanne, M., 311  
Salardon, R., 230  
Salazar, E., 15, 19  
Salel, J.-F., 214  
Salindre, J.J., 42  
Salles, F., 294, 318  
Salomé, M., 472  
Salpin, M., 482, 483  
Saltel, M., 448, 452  
Salvi, S., 353–355, 359, 362, 365, 368, 371  
Samai, S., 36  
Samet, B., 384  
San Pedro, L., 36, 90, 95, 163  
Sancelme, M., 400  
Sánchez, E., 243  
Sanchez Goni, M., 269  
Sanchez Pellicer, R., 249  
Sanchez, C., 19, 77  
Sanchez, G., 194  
Sangaré, A., 354  
Sangaré, S., 354  
Sangu, E., 189  
Sani-Kast, N., 399  
Sanjuan, J., 428  
Sans Jofre, P., 115, 253

- Santaella, C., 397, 399  
 Santamaria, C., 222  
 Santamaria, J., 222–224  
 Santoire, J.-P., 42  
 Santolaria Otin, P., 241–243  
 Santoni, S., 449  
 Santos Mulholland, D., 431, 435  
 Santos, L., 457  
 Sapin, F., 151  
 Saplaïroles, M., 456  
 Saquaque, A., 378  
 Saracco, G., 309  
 Sardini, P., 386  
 Sarout, J., 304  
 Sarr, A.-C., 72  
 Sarret, G., 399, 408, 414, 416  
 Sarthou, G., 437  
 Sartégou, A., 212  
 Sassi, W., 203  
 Saumitou-Laprade, P., 416  
 Saura, E., 121, 200, 212, 231  
 Sauter, D., 146  
 Sauzéat, L., 129  
 Savané, I., 290  
 Savva, D., 144  
 Scaillet, B., 137, 138, 334  
 Scalabrino, B., 182  
 Schaefer, J., 276  
 Schaeffer, N., 127  
 Schaeffer, P., 115, 117, 281  
 Schäfer, J., 428  
 Schauble, E., 388  
 Schaumloeffel, D., 474, 475  
 Scheffer, C., 174, 185, 381  
 Scheffers, A., 351  
 Schenini, L., 155, 160  
 Schiano, P., 142  
 Schimmelpfennig, I., 276  
 Schindelé, F., 43  
 Schlüchter, C., 276  
 Schmidt, S., 20, 23, 89  
 Schmutz, M., 286  
 Schnabele, M., 76  
 Schneider, A., 407  
 Schneider, J., 181, 184, 415  
 Schneider, J.-L., 42, 45, 90, 93  
 Schneider, R., 266  
 Schnurle, P., 76, 100, 149–151, 154–156  
 Schnyder, J., 91, 118, 481–483  
 Schreck, E., 414–416, 418  
 Schreiber, D., 493  
 Schroëtter, J.-M., 26  
 Schubnel, A., 298, 486  
 Schulmann, K., 157, 171, 174, 180, 184, 186, 218, 491  
 Schwartz, H., 105  
 Schwartz, S., 146  
 Schwartzberg, A., 395, 401  
 Scott, T., 112  
 Scotti, O., 40  
 Sebane, A., 249  
 Sebastianutti, S., 398  
 Sèbe, O., 43  
 Sebilo, M., 224, 246  
 Sebastianutti, S., 406, 415  
 Sefi, H., 66  
 Segalen, L., 246  
 Seghir, E., 381  
 Seghir, N., 369  
 Seibert, C., 90  
 Seidel, J.-L., 450  
 Seifi, S., 383  
 Seignovert, B., 53  
 Seitsonen, A.P., 363  
 Sejalon-Delmas, N., 414  
 Sekhar, M., 454  
 Seltmann, R., 171  
 Semchaoui, A., 369  
 Sénéchal, G., 34, 486  
 Sénéchal, P., 295, 475  
 Senechal, N., 110, 112  
 Sengelen, X., 43  
 Senhoury, O., 47  
 Senut, B., 77  
 Senyarich, C., 281  
 Serclerat, I., 385  
 Sergeant, C., 406  
 Serin, J.-P., 442, 444  
 Serrano, O., 70, 211, 234  
 Setti Belaroui, L., 387  
 Sevin, B., 26, 27  
 Seydoux-Guillaume, A.-M., 339, 340, 342, 384  
 Seyler, P., 435  
 Seyve, C., 96, 102  
 Shahid, M., 418  
 Shintu, L., 397  
 Shirokova, L., 431  
 Sial, A., 253  
 Siani, G., 266  
 Siboulet, B., 312  
 Sibourg, O., 422  
 Sicre, M.-A., 269  
 Siebenaller, L., 347, 353, 354, 359, 371  
 Sierro, F., 94, 269  
 Silva Jacinto, R., 24, 88  
 Simeone, P., 386  
 Simoes, M., 68  
 Simon, B., 153, 215  
 Simon, V., 223, 224  
 Simonin, M., 398  
 Simonneau, A., 13, 14, 221, 224, 225  
 Simonucci, C., 503  
 Siniapkin, S., 384  
 Sissmann, O., 330  
 Sivry, Y., 408, 432, 434, 450, 473  
 Sizaret, S., 355, 356, 363, 377  
 Sizun, J.-P., 307  
 Skrzypek, E., 180  
 Slaveykova, V., 405  
 Slomberg, D., 399, 400  
 Smeaton, C.M., 405  
 Smith, I., 55  
 Soare, R., 53  
 Soares, J., 151  
 Sobanska, S., 414  
 Sobolev, S., 163  
 Socquet, A., 144  
 Sohou, Z., 112  
 Sokol, G., 492  
 Sola, C., 222  
 Sola-Larrañaga, C., 222, 224  
 Soldner, J., 174  
 Solgadi, F., 368  
 Soltani, A., 421  
 Soltis, J., 395  
 Sondag, F., 435  
 Songore, T., 353  
 Sonke, J., 220, 222, 429, 434, 435, 437, 438, 450  
 Sonzogni, C., 268  
 Soret, M., 174  
 Soriano, M., 276  
 Sorrel, P., 115  
 Sorriaux, P., 276  
 Sosson, M., 172, 173  
 Sotin, C., 94  
 Soto Marín, R., 241, 243  
 Sottolichio, A., 23  
 Soubrand, M., 408, 409  
 Soucek, O., 53  
 Soufi S., 320  
 Souhaut, M., 225  
 Souhel, A., 64  
 Soullaine, C., 454  
 Soulet, Q., 91  
 Souloumiac, P., 207  
 Souriau, A., 126, 236  
 Sous, D., 22, 109, 113  
 Soussou, S., 407  
 Spadini, L., 406, 415  
 Sparks, S., 135  
 Spiga, A., 55  
 Squarcioni, P., 327  
 Stab, M., 154  
 Stab, O., 14  
 Stack, A., 473  
 Stanek, M., 315  
 Staniszewski, Y., 327  
 Steckiewicz-Laurent, W., 454  
 Steinmann, M., 466  
 Stephan, J.-F., 478  
 Stephen, D., 122, 249, 260  
 Sternai, P., 168, 369  
 Sternberg, T., 49  
 Sterpenich, J., 84  
 Stetten, E., 91, 281  
 Steuer, S., 144  
 Stevens, G., 177  
 Steyer, J.-S., 248  
 Stille, P., 13  
 Štípská, P., 174, 186  
 Stoll, S., 397, 399, 401  
 Strader, M.L., 401  
 Straub, S., 389  
 Stuart, G., 156  
 Stünitz, H., 185  
 Suan, G., 481–483  
 Suanez, S., 111  
 Suarez-Ruiz, I., 234  
 Suc, J.-P., 8, 60, 75, 79, 236, 481–483  
 Suchéras-Marx, B., 248  
 Sue, C., 195  
 Sukhovich, A., 22  
 Sultan, N., 88  
 Sundby, B., 118  
 Susini, J., 472  
 Swennen, R., 82, 304, 307  
 Sylvander, M., 235, 236, 244, 245  
 Sylvi, L., 423  
 Szabo, Z., 330  
 Szulc, A., 201
- ## T
- Tabaud, A.-S., 180  
 Taboada, A., 207  
 Tabouret, H., 221  
 Tachikawa, K., 13, 221, 268  
 Taffetani, C., 350  
 Tahayt, A., 35  
 Taieb, M., 271  
 Taillefer, A., 207  
 Takahashi, Y., 410  
 Tallobre, C., 94  
 Tamas, C., 348  
 Tanguy, A., 317  
 Tarantola, A., 174, 185, 381  
 Tardy, J.-P., 384  
 Targuisti, K., 132  
 Tarrieu, L., 356  
 Tartu, S., 437  
 Tartèse, R., 374  
 Tassy, A., 10  
 Tavio-Guého, C., 385  
 Tazi, S., 311  
 Team Erd-Alps, 194  
 Teinturier, S., 82  
 Teisserenc, R., 438  
 Teitler, Y., 254  
 Teixell, A., 230, 235, 237, 240  
 Temiz, H., 67, 172  
 Tercé, N., 474  
 Téreygeol, F., 350  
 Terrier, M., 24, 71  
 Terrisse, F., 424  
 Tertre, E., 383, 386  
 Tessier, B., 60  
 Tessier, E., 222, 426–428, 431, 437  
 Tesson, J., 31, 36  
 Tesson, S., 311  
 Testemale, D., 416, 471  
 Teyssier, C., 178  
 Thaler, C., 116

- Tharaud, M., 408, 450  
 Thauvin, E., 43  
 Thébault, J., 426  
 Thebault, E., 57  
 Theodorakopoulos, N., 406  
 Thesenga, D., 508, 509  
 Thibault, A., 280  
 Thibeau, S., 326  
 Thiebault, T., 282, 387  
 Thiery, Y., 40, 49  
 Thinon, I., 60, 69, 70, 103, 110, 149, 150  
 Thiry, Y., 407, 416  
 Thiéblemont, D., 270  
 Thiéblemont, R., 270  
 Thiéry, A., 397  
 Thiéry, R., 161  
 Thomas, B., 428, 429, 448  
 Thomas, Y., 104  
 Thomas, Y.-F., 47  
 Thomassot, E., 364  
 Thomazo, C., 122, 252, 254, 260  
 Thouin, H., 405  
 Thouveny, N., 274  
 Thöni, L., 224  
 Tibari, B., 231, 237  
 Tiberi, C., 245  
 Tiliacos, A., 109  
 Tills, A., 483  
 Tindall, J., 265  
 Tinnacher, R., 311  
 Tissandier, L., 129  
 Tissoux, H., 27  
 Toldo, E., 117  
 Toleukhanov, A., 334  
 Tomer, S., 454  
 Tondella, E., 183  
 TopoAfrica, 63  
 Toqeer, M., 70  
 Torne, M., 200  
 Torre-Marín, M.L., 186  
 Touahria, A., 249  
 Toubal, A., 172  
 Toubassy, M., 426  
 Touboul, D., 473  
 Toucanne, S., 24, 78  
 Toullec, R., 107  
 Toumoulin, A., 250  
 Tourlière, B., 27  
 Tournadour, E., 92, 93  
 Tournassat, C., 311  
 Toussaint, R., 294, 295  
 Town, J., 508, 509  
 Traoré, D., 359  
 Traoré, K., 378  
 Trap, P., 180, 181, 184, 339, 341, 374, 493  
 Trapananti, A., 407  
 Traversa, P., 24  
 Trcera, N., 349, 361, 407, 472, 475  
 Tremblay, A., 358  
 Trévisan, J., 29  
 Tréziny, H., 58  
 Triantafyllou, A., 169  
 Trias, S., 187  
 Tribouvillard, N., 61, 69, 115, 118  
 Tric, E., 40  
 Trincal, V., 217  
 Trindade, R., 139, 253, 255, 398  
 Tritlla, J., 365  
 Trouzine, H., 320  
 Truche, L., 334, 364  
 Trullenque, G., 298  
 Tubía, J.M., 233  
 Tuduri, J., 342, 368, 373, 511  
 Tugend, J., 229  
 Turillot, P., 341  
 Turlin, F., 353  
 Turq, P., 312  
 Turrini, C., 208  
 Tütken, T., 257  
 Tuzcu, S., 67
- U**  
 Ubrig, N., 362  
 Umbhauer, F., 386  
 Ungerer, P., 311  
 Unternehr, P., 151, 152, 192, 227  
 Urai, J., 317  
 Urgeles, R., 88, 100  
 Ursule, N., 138  
 Urvois, M., 492  
 Usoskin, F., 57  
 Uzu, G., 398, 414
- V**  
 Vacelet, M., 161, 233  
 Vacherat, A., 231, 233, 237, 239  
 Vacquand, C., 335  
 Valer, M., 142  
 Valla, P., 18  
 Vallet, A., 44  
 Vallet, L., 234  
 Van Beek, P., 224, 225, 480  
 Van Camp, M., 463  
 Van Cappellen, P., 405  
 Van Daele, M., 34  
 Van Damme, H., 294, 317, 318  
 Van Den Driessche, J., 76, 183, 244  
 Van Der Beek, P., 167, 236  
 Van Genuchten, C., 395  
 Van Hinsbergen, D., 266  
 Van Hullebusch, E., 434, 475  
 Van Kranendonk, M., 252, 254  
 Van Lichtervelde, M., 339, 361  
 Van Rooij, D., 272  
 Van Vliet-Lanoë, B., 23  
 Vanbellingen, Q., 473  
 Vandamme, M., 303, 317  
 Vanderhaeghe, O., 168, 174, 177, 180, 185, 353, 381  
 Vandycke, S., 169, 304  
 Vanhaesebroucke, M., 94  
 Vanlandschoot, P., 304  
 Vantelon, D., 396, 411, 416, 472  
 Varcin, A., 41  
 Vasconcelos, C., 117  
 Vasquez, L., 215  
 Vassallo, R., 14, 34  
 Vauchez, A., 130, 227  
 Vaute, L., 454  
 Vautier, Y., 72, 242  
 Vazquez-Prada, D., 507  
 Vega, M., 200  
 Veillerette, A., 123  
 Velasquez, G., 353, 354, 371  
 Vella, C., 49  
 Veltz, I., 506  
 Vendeville, B., 10, 101, 106, 150, 204, 213  
 Vennin, E., 122, 249, 252, 254, 257, 260  
 Ventalon, S., 374  
 Verati, C., 162  
 Verbruggen, N., 416  
 Vercouter, T., 406  
 Vergnaud-Ayraud, V., 449  
 Vergès, J., 121, 200, 212, 231, 233, 239  
 Verlaguet, A., 191, 192, 196, 330  
 Verna, M., 498  
 Vernant, P., 18, 29, 31, 193, 244  
 Vernet, G., 346  
 Verney-Carron, A., 475  
 Vernier, F., 457  
 Vernier, J.-L., 42  
 Vétion, G., 280, 281  
 Veylon, G., 46  
 Vézinet, A., 177  
 Vial, B., 217  
 Viana, A., 100, 151, 156  
 Vicendo, P., 396  
 Vidal, L., 268  
 Vidal, M., 40, 236  
 Vidal, O., 131  
 Vidal-Gilbert, S., 303  
 Vidard, A., 503  
 Vidier, D., 69  
 Vieira, L., 431, 435  
 Viel, E., 455  
 Viers, J., 77, 416, 431, 433  
 Viète, D., 160  
 Viggiani, G., 317  
 Vignon, V., 238  
 Villalafín, J., 243, 300  
 Villanueva, J., 397  
 Villard, P., 298  
 Villaros, A., 136, 141, 180, 361  
 Villarroel Salcedo, J., 465  
 Villaseñor, A., 200, 235, 245  
 Villemant, B., 196  
 Villeneuve, J., 334, 336  
 Villette, M., 58  
 Villier, L., 249  
 Villiéras, F., 396, 401  
 Vince, E., 406, 415  
 Vincent, B., 308  
 Vinçon-Laugier, A., 283  
 Vinol-Lelarge, L., 8  
 Vinour, P., 512  
 Violeau, D., 24  
 Viollier, E., 444  
 Virgone, A., 151  
 Virmont, J., 346  
 Viseur, S., 44, 298, 300, 309  
 Visini, F., 31  
 Visscher, P., 122  
 Vitale-Brovarone, A., 174  
 Vitard, C., 160, 164  
 Viville, D., 13  
 Voinchet, P., 14  
 Voisin, C., 267, 453, 486–488  
 Voisset, M., 101  
 Vrielynck, B., 67, 266  
 Vuilleumier, R., 363, 366
- W**  
 Wafik, A., 131, 376, 378–380  
 Wagner, R., 202  
 Wälle, M., 362  
 Wallinga, J., 16  
 Walpersdorf, A., 195  
 Walter, B., 300  
 Walter, F., 340  
 Walter-Simonnet, A.-V., 266  
 Wang, B., 174  
 Wang, H., 281  
 Wang, L., 317  
 Wang, S., 16  
 Warden, S., 292  
 Wasilewski, B., 483  
 Wassermann, J., 304  
 Wassmer, P., 113  
 Watlet, A., 463  
 Watremez, L., 155  
 Waychunas, G., 473  
 Weemstra, K., 156  
 Wenmenga, U., 355  
 Werner, P., 147  
 Wernli, R., 67  
 Weschenfelder, J., 117  
 Whitaker, M., 474  
 Whitechurch, H., 180  
 Whitehouse, M., 257, 340, 341  
 Whitney, D., 178  
 Wilhelm, B., 194, 274  
 Wille, G., 406  
 Willequet, O., 328  
 Williams, T., 94  
 Williams-Jones, A., 365, 368  
 Williamson, D., 280, 282

Witt, C., 29, 203, 204  
Woppelmann, G., 164  
Worms, I., 405  
Wu, S., 206  
Wyns, R., 26, 456

## X

Xavier, J.-P., 50, 61  
Xiong, T., 415, 416  
Xu, X., 15

## Y

Yaich, C., 66

Yamamoto, Y., 299  
Yamato, P., 145  
Yan, C., 377  
Yans, J., 356, 372  
Ydri, A., 36  
Ye, J., 76, 153  
Yeghicheyan, D., 450  
Yekta, A., 334  
Yelles, A., 150  
Yelles-Chaouche, A., 29  
Yi Sun, M., 280  
Yiannourakou, M., 311  
Yin, N., 434  
Yongxing, G., 206

Yoon, D., 481, 482  
Youbi, N., 84, 131  
Yousaf, J., 385  
Yousaf, Z., 17  
Yven, B., 307, 308

## Z

Zaghloul, M., 11, 113  
Zajac, J., 294, 318  
Zami, F., 162  
Zamora, M., 294  
Zaragosi, S., 45, 89, 90, 95  
Zargouni, F., 65, 202, 207  
Zarzycki, P., 395

Zeh, A., 141, 177, 368  
Zelano, I., 408, 432  
Zéraphie, S., 13, 236  
Zerouki, T., 369  
Zeyen, H., 486  
Zgonnik, V., 334  
Zhao, L., 193  
Žigaitė, Ž., 257, 481  
Zigone, D., 488  
Zocatelli, R., 279  
Zouhri, L., 289  
Zumsprekelz, H., 492  
Zylberman, W., 41, 45, 46  
Zyserman, F., 292

# Partenaires de la RST2014

## PARTENAIRES PRINCIPAUX (\* exposant à la RST2014)



**Pau Porte des Pyrénées**  
Pau Pyrénées Tourisme

Comité d'Agglomération Pau-Pyrénées



\*TOTAL



Institut National des Sciences de l'Univers



Commissariat à l'Énergie Atomique  
et aux énergies alternatives



AREVA



\*Bureau de Recherches Géologiques et Minières



GDF-SUEZ



\*VAREL



Ministère de l'Éducation,  
de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche



Région Aquitaine



INRIA



ANDRA



IFP - Énergies Nouvelles



Schlumberger



\*SPIE Oil & Gas services



Actions Marges



\*IODP France



Université de Pau et des Pays de l'Adour



Conseil Général des Pyrénées-Atlantiques



\*ECORD

**PARTENAIRES (\* exposant à la RST2014)**



\*ABEM France



\*AERI-BROT LAB



Agence de l'eau Adour-Garonne



\*Ambrosia Technologies



BETA Analytic



\*CAMECA



Chambre de commerce et d'industrie Pau-Béarn



\*DUNOD Editeur



\*ELEMENTAR France



ESRI France



\*IRIS Instruments



ISIFOR



\*IXBLUE



Beauvais • Institut Polytechnique  
Sciences de la Terre, du Vivant et de l'Environnement

LaSalle Beauvais



MICROSYSTEMS

\*LEICA



\*SARL Lithologie Bourgogne



\*SARM / CNRS



\*SDEC France



Société Géologique de France  
Des géologues au service de la société

\*Société Géologique de France



STC TSL  
Thin Section Lab  
De la carothèque à la lame mince

\*Thins Section Lab



\*SYMALAB



Part of Thermo Fisher Scientific

\*Thermo Scientific



\*UNICEM Aquitaine



well Staff.  
Well Staff

## ASSOCIATIONS ET SOCIÉTÉS SAVANTES PARTENAIRES (\* exposant à la RST2014)



\*Association des géologues du Sud-Ouest



Association des Sédimentologues Français



AVENIA



\*Cap Terre



\*Commission de la Carte Géologique du Monde



CNFGG

EDUGEA



\*GEOLVAL



Groupe Français des Argiles



**Société Française des Isotopes Stables**



**\*Société Française de Minéralogie  
et de Cristallographie**



**Society for Geology applied  
to Mineral Deposits**



Formations & Conseil



**UT2A**

# Comité d'organisation de la RST2014

ORGANISATEUR : **Daniel Brito** (UPPA)

CO-ORGANISATEURS PRINCIPAUX :

**Charles Aubourg** (UPPA, forum « Comprendre et Enseigner les Géosciences », livre programme, organisation générale), **Tiphaine Boiron** (UPPA, livre programme), **Cédric Bonnel** (UPPA, livre programme, graphisme), **Clarisse Bordes** (UPPA, logistique), **Jean-Paul Callot** (UPPA, forum des métiers, organisation générale), **Guilhem Hoareau** (UPPA, webmaster), **Marie-Pierre Isaure** (UPPA, logistique), **Marie-Laure Rius** (UPPA, gestion, administration), **Guy Sénéchal** (UPPA, logistique), **Pascale Sénéchal** (UPPA, gestion des stands).

CO-ORGANISATEURS :

**Joëlle Arriulou** (UPPA, logistique), **Alain Bourg** (UPPA), **Marion Burgio** (Lycée Louis Barthou, forum « Comprendre et Enseigner les Géosciences »), **Adrian Cerepi** (Université de Bordeaux), **Jean-Claude Christophe** (CS), **Sandrine Craveiro** (UPPA, graphisme), **Michel de Saint Blanquat** (Université de Toulouse, lien avec Toulouse), **Bertrand Fasentieux** (UPPA), **Guillaume Galliéro** (UPPA, forum des métiers), **Sylvie Grimaud** (Total, lien avec Total), **Yves Hervouët** (UPPA), **Jean-Jacques Jarrige** (SGF, lien avec la SGF), **Carine Moulia** (Technopole Hélioparc, forum des métiers), **Bertrand Nivière** (UPPA).

# Comité scientifique de la RST2014

**Charles Aubourg** (UPPA), **Hélène Barucq** (UPPA), **Didier Béziat** (Université de Toulouse), **Cédric Bonnel** (UPPA), **Clarisse Bordes** (UPPA), **Alain Bourg** (UPPA), **Daniel Brito** (UPPA), **Jacques Brulhet** (ANDRA), **Jean-Paul Callot** (UPPA), **Gérôme Calvès** (Université de Toulouse), **Adrian Cerepi** (Université de Bordeaux), **Frédéric Christophoul** (Université de Toulouse), **Isabelle Cojan** (SGF), **Michel de Saint Blanquat** (Université de Toulouse), **Jean-François Deconinck** (Université de Dijon, ASF), **Guillaume Dera** (Université de Toulouse), **Michel Diament** (INSU), **Olivier Donard** (UPPA), **Stephanie Duchêne** (Université de Toulouse), **Christophe Emblanch** (Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse), **Bruno Goffé** (Aix Marseille Université), **Pol Guennoc** (BRGM), **Guilhem Hoareau** (UPPA), **Damien Huyghe** (Université de Toulouse), **Marie-Pierre Isaure** (UPPA), **Francois Martin** (Université de Toulouse), **Joseph Martinod** (Université de Toulouse), **Jean-Michel Matray** (IRSN), **Thierry Mulder** (Université de Bordeaux), **Marc Nicolas** (CEA), **Bertrand Nivière** (UPPA), **Hervé Perroud** (UPPA), **Gilles Pijaudier-Cabot** (UPPA), **Franck Poitrasson** (Université de Toulouse), **Vincent Regard** (Université de Toulouse), **Jean-Claude Ringenbach** (Total), **Cécile Robin-Guillocheau** (Université de Rennes), **Stefano Salvi** (Université de Toulouse), **Guy Sénéchal** (UPPA), **Jeroen Sonke** (Université de Toulouse).