



26<sup>e</sup> Réunion des Sciences de la Terre | 26<sup>th</sup> Earth Sciences Meeting

# Livre des résumés

# Abstracts





## Comité d'Organisation

Le Comité d'Organisation est composé essentiellement de personnel des structures lilloises et des représentants de la SGF. Il a en charge la coordination de l'organisation de la RST.

### Co-présidents

Sylvain Charbonnier (Président de la SGF)  
Alain Trentesaux (LOG Lille, SGN)

### Membres de droit

Patrick Auguste (Trésorier de la SGF, EEP, SGN)  
Thibault Josselin (Président de la section Jeunes de la SGF)  
Nicolas Tribovillard (Président du Comité scientifique, LOG Lille)

### Membres délégués

Alain Blieck (SGN)  
Franck Bourdelle (LGCgE Lille)  
Nadège Hilairet (UMET Lille)  
François Leparmetier (Vice-président aux affaires professionnelles de la SGF)  
Emily Lloret (LGCgE Lille)  
Francis Meilliez (LOG Lille, SGN)  
François Schmitt (Directeur du LOG Lille)

### Suivi opérationnel et logistique

Solange Chaimbault (Directrice de la SGF)  
Sébastien Garnaud (Responsable communication de la SGF)  
Sylvain Grosbois (Chargé événementiel et partenariats de la SGF)

### Délégués locaux

Eric Armynot du Châtelet (LOG Lille)  
Béatrice Beauvière (Lille)  
Viviane Bout (LOG Lille)  
Sophie Cornil (Lille)  
Jessie Cuvelier (EEP, SGN)  
Marion Delattre (LOG Lille)  
Andrée Duchemin (SGN)  
Cyril Durand (LGCgE Lille)  
Monique Gentric (Gestionnaire LOG Lille)  
Fabien Graveleau (LOG Lille, SGN)  
Nicolas Grevet (Inspecteur d'académie SVT, Lille)  
Valérie Plouvin (LOG Wimereux)  
Agnès Prudhomme (Lille, SGN)  
Melesio Quijada (LOG Lille)  
Jean-Yves Reynaud (LOG Lille, SGN)  
Armelle Riboulleau (LOG Lille)  
Sandra Ventalon (LOG Lille)  
Louise Watremez (LOG Lille)

## Comité Scientifique

Le Comité Scientifique est composé de scientifiques locaux et de personnes en charge de l'organisation des thèmes et sessions.

### Président

Nicolas Tribovillard (LOG Lille)

### Membres délégués

Danièle Grosheny (Vice-présidente à l'animation scientifique de la SGF)  
Laurent Jolivet (Rédacteur en chef du BSGF-Earth Sciences Bulletin)  
Emanuela Mattioli (Responsable RST Lyon 2020)

### Délégués par spécialités

Patrick Auguste (Trésorier de la SGF, EEP, SGN)  
Françoise Bergerat (UPMC Paris, AGBP)

Aloys Bory (LOG Lille)

Sébastien Clausen (EEP Lille)  
Patrick Cordier (UMET Lille)  
Catherine Crônier (EEP Lille)  
Taniel Danelian (EEP Lille, SGN)  
Virginie Gaullier (LOG Lille)  
Patrick Gaviglio (Président de l'AGSE)  
Annette Hofmann (LOG Lille)  
Murielle Meurisse-Fort (Département du Pas-de-Calais)  
Emmanuel Tric (Géoazur Nice)  
Alain Trentesaux (LOG Lille, SGN)  
Bruno Vendeville (LOG Lille)  
Cesar Witt (LOG Lille)

## Table des sessions

<b>1. Sédimentologie/bassins &amp; domaines sédimentaires .....</b>	<b>4</b>
1.1. Stratigraphie intégrée des bassins sédimentaires.....	5
1.2. Source-to-Sink : nouvelles approches pour la compréhension des couplages surface-profondeur, cas d'études et méthodologies .....	34
1.3. Matière organique dans les milieux sédimentaires passés et actuels .....	59
1.4. Evolution des systèmes côtiers actuels et anciens & Dynamique sédimentaire .....	70
1.5. Cycles sédimentaires et cycles tectoniques // Les figures d'expulsion, marqueurs et traceurs des circulations de fluides en sub-surface dans les bassins sédimentaires .....	91
1.6. Diagenèse/Authigenèse.....	120
1.7. La Craie, de la sédimentologie, à la fracturation et aux propriétés mécaniques ou de réservoir .....	143
<b>2. Géodynamique / tectonique - Systèmes orogéniques et mécanique de la lithosphère .....</b>	<b>149</b>
2.1. La chaîne varisque .....	150
2.2. Dynamique des chaînes de montagnes.....	182
2.3. Pyrénées, Téthys et Méditerranée Occidentale.....	207
2.4. Du rifting à l'océanisation - Observations et modélisations.....	243
2.5. De l'arrière- à l'avant-arc : tectonique et sédimentation des zones de subduction .....	272
<b>3. Paléontologie .....</b>	<b>288</b>
3.1 Biodiversity, ecosystems and climate change: a prospective from the past / La paléontologie : de la macroévolution à la macroécologie.....	289
3.2 Micropaleontology in Earth sciences: implications in biostratigraphy, paleoceanography, paleoclimate and evolution .....	302
3.3 Paleobiosphère paléoécologie : Vie et paléoenvironnements au Précambrien .....	320
3.4. Extinctions de masse : des observations aux mécanismes.....	336
<b>4. Géorisques et réhabilitation des écosystèmes terrestres.....</b>	<b>338</b>
4.1. Dégradation et réhabilitation des écosystèmes terrestres.....	339
4.2. Rôle des végétaux sur la dynamique et la disponibilité des éléments chimiques .....	349
4.3. Suivi de processus biogéochimiques par mesure haute fréquence // Archivage géologique des pollutions.....	359
4.4. L'imagerie radar pour les Géosciences : la révolution SENTINEL 1A/1B.....	373
<b>5. Le système Manche / Mer du Nord .....</b>	<b>384</b>
<b>6. Aux frontières de la Géologie, planétologie, système solaire, univers .....</b>	<b>390</b>

<b>7. Paléoclimatologie et paléoenvironnement .....</b>	<b>398</b>
7.1. Climatologie et paléoclimatologie.....	399
7.2. Traçage des transferts terrigènes actuels et passés – implications paléoclimatiques // Les méthodes magnétiques à la rescousse de la géodynamique et des paléoenvironnements ....	417
<b>8. Pétrologie / Minéralogie / Géochronologie.....</b>	<b>427</b>
8.1. Pétrologie et chronologie métamorphique, Pétrochronologie // Métallogénie et hydrothermalisme : du terrain au laboratoire.....	428
8.2. Interactions fluide-roche : des météorites à la Terre .....	475
<b>9. Archéométrie, archéologie .....</b>	<b>485</b>
<b>10. Patrimoine, histoire, diffusion des sciences de la Terre .....</b>	<b>531</b>
10.1. Le patrimoine géologique (sensu lato) .....	532
10.2 Géologie et Grande Guerre .....	546
<b>11. Physique des roches : rhéologie et changements d'échelles.....</b>	<b>564</b>
<b>12. Hydrogéologie // Interaction eaux souterraines et écosystèmes.....</b>	<b>571</b>
<b>13. Géomorphologie et Géologie de la surface.....</b>	<b>586</b>
13.1. Les récents grands séismes // Tectonique salifère et argileuse // Tectonique active et morphogenèse .....	587
13.2. Cartographie et modélisation de la surface // Géologie urbaine // Karstologie, outils, processus et marqueurs paléogéographiques // La place du karst dans la zone critique : ses spécificités depuis les outils d'observation jusqu'à la modélisation .....	608
13.3. Apports des analyses thermiques à la caractérisation de la matière organique des sols	634
<b>14. Ressources .....</b>	<b>645</b>
14.1. Géomatériaux : de l'extraction à la conservation/valorisation.....	646
14.2. Géothermie.....	661
14.3. Température et flux de chaleur.....	677
14.4. Géomatique appliquée à l'exploration // Acceptabilité sociale de l'usage du sous-sol // Mines et après-mines : de la découverte d'un gisement à la gestion post-exploitation.....	680
14.5. Géodynamique et systèmes minéralisés .....	696
<b>15. Grands programmes – Grands projets.....</b>	<b>706</b>
15.1. RGF Référentiel Géologique de la France .....	707
15.2. PICG - Global Change and the Evolution of Life: Evidence from the Geological Record .....	710
15.3 Restitution des projets TELLUS CNRS-INSU.....	712
15.4 Projets Agence Nationale de la Recherche.....	723
<b>Index par auteurs.....</b>	<b>724</b>



# 1. SEDIMENTOLOGIE/BASSINS & DOMAINES SEDIMENTAIRES



## 1.1. Stratigraphie intégrée des bassins sédimentaires

## Le Crétacé septentrional du bassin des Ksour (Algérie): résultats préliminaires

Mustapha Bensalah <sup>\*1</sup>, Abdelkader Mennad <sup>2</sup>, Rodolphe Tabuce <sup>3</sup>, Guillaume Guinot <sup>3</sup>, Raphaël Sarr <sup>4</sup>, Madani Benyoucef <sup>5</sup>, Enri Cappetta <sup>2</sup>, André Charrière <sup>6</sup>, Mohammed Adaci <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de recherche n25, Département des Sciences de la Terre - Université Abou Bekr Belkaïd, B.P. 119 Tlemcen 13000, Algérie

<sup>2</sup>Département des Sciences de la Terre et de l'Univers, Laboratoire de Recherche n°25 «PRHPM-LECT», Université de Tlemcen, 13000. Algérie

<sup>3</sup>Equipe de Paléontologie, Cc 064, Institut des Sciences de l'Evolution (UM2-CNRS, IRD, EPHE), Université de Montpellier, Place Eugène Bataillon F-34095 Montpellier cedex 5. France

<sup>4</sup>Laboratoire de Sédimentologie et Biostratigraphie, Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, B. P. 5005 Dakar-Fann. Sénégal

<sup>5</sup>Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département des Sciences de la Terre et de l'Univers, Université de Mustapha Stambouli de Mascara, Mascara 29000. Algérie

<sup>6</sup>26, rue Jean Pierre Chabrol, F-34740 Vendargues. France

La coupe de Forthassa, située dans l'extrême Ouest de l'Atlas saharien occidentale (Monts des Ksour, Algérie), a fait l'objet d'une étude lithostratigraphique, paléontologique et paléoenvironnementale. Elle montre une succession de deux formations : Formation de Mdaouer et Formation de Rhoundjaïa. L'étude détaillée de la Formation de Mdaouer montre une série sédimentaire constituée de calcaires à lamination algaires, de marnes verdâtres ou rougeâtres alternant occasionnellement avec des niveaux silicoclastiques (grès chenalés) formant la Formation de Mdaouer. Les termes marneux ont livré une faune de vertébrés de sélaciens (*Mafedetia tibniensis*, *Baharipristis bastetiae* et *pycnodontiformes*) et une microfaune d'ostracodes (*Damonella* sp. 1, *Damonella* sp.3, *Ilyocypris* sp., *Paracypris* sp., et un genre et espèce indéterminé).

Cet assemblage paléontologique suggère un âge cénonanien inférieur à moyen pour la Formation de Mdaouer. La succession rythmique des lithofaciès cités précédemment, le long de la série, indique un milieu de plaine côtière dominée par des actions de courants de marées. Par ailleurs, les ostracodes sont caractéristiques d'un milieu dulçaquicole où la salinité est comprise entre 0 et 5 ‰.

**Mots-Clés:** Cénomanien, sélaciens, rajiformes, ostracodes, plaine côtière, marée, Monts des Ksour, Algérie.

<sup>\*</sup>Intervenant

## Sedimentary architecture, depositional facies and diagenetic response to intracratonic deformation and climate change inferred from outcrops for a pivotal period (Jurassic/Cretaceous boundary, Paris Basin, France)

Benjamin Brigaud <sup>\*1</sup>, Benoît Vincent <sup>2</sup>, Maurice Pagel <sup>1</sup>, Antoine Gras <sup>1</sup>, Aurélie Noret <sup>1</sup>, Philippe Landrein <sup>3</sup>, Emilia Huret <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Paris Sud (GEOPS) – Université Paris-Sud - Paris 11, Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS : UMR8148 - France

<sup>2</sup> Cambridge Carbonate – Royaume-Uni

<sup>3</sup> Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) – Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs – France

The aim of this study is to decipher the respective influences of geodynamic and climate disturbances at the Jurassic/Cretaceous boundary on sedimentary facies and carbonate diagenesis in a stable intracratonic basin using isotopic geochemistry and subsidence quantification. Fourteen lithofacies were deposited in a (1) carbonate platform and (2) a delta plain environment. Climate change from cool and wet to warm and semi-arid conditions during the early Tithonian influenced the syn-sedimentary dolomitization process within the carbonate platform during the mid-Tithonian. Architecture and facies reconstructions well-constrained the Jurassic-Cretaceous Unconformity (JCU), which was an important local structural episode marked by (1) an 80 m uplift in the eastern Paris Basin and by (2) the formation of a NW-SE low wavelength 15 km-wide and 30 km-long flexure. This first tectonic event tended to maintain brine ponds and supratidal marsh environments in the platform during the late Tithonian and early Berriasian, forming Purbeckian facies and associated dolomitic facies. A major depositional change occurred between the early and late Berriasian from shallow carbonate platform environments to fluvial-deltaic clastic deposits (Wealden facies). This facies change is underlain by a major unconformity corresponding to the Ryazanian unconformity. It is marked (1) by erosion processes, karstification of the carbonate substrate, and the development of ferruginous weathering products (goethite), followed by (2) incision processes in a fluvial-deltaic environment. This unconformity is consecutive to a 40 m uplift in the eastern Paris Basin. The rifting phase in the Bay of Biscay, in the Pyrenean Zone, and in the Arctic-North Atlantic together with the opening of the Ligurian Sea had a major influence on the northern part of France by causing uplifts (120 m from the Tithonian) and flexuring. Geodynamics played a major role in carbonate demise in the Paris Basin leading to exposure and karstification of the carbonate platform. Added to the generalized uplift, western Tethyan cool and humid conditions from the late Berriasian caused terrigenous influx into large-scale marine domains which was detrimental and unfavorable to carbonate growth.

**Mots-Clés:** Carbonate Facies Purbeck beds Jurassic Stratigraphy Diagenesis

\*Intervenant

## Evolution plio-pleistocène du delta de la rivière Omo (Formation de Shungura, Groupe de l’Omo, Dépression du Turkana, Rift Est-Africain) : faciès et architectures sédimentaires.

Marion Corbé <sup>\*ψ1</sup>, Alexis Nutz <sup>2</sup>, Mathieu Schuster <sup>3</sup>, Anne Delagnes <sup>4</sup>, Jean-Renaud Boisserie <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Paléontologie Evolution Paléoécosystèmes Paléoprimatologie, U. Poitiers, UMR 7262, CNRS INEE

<sup>2</sup> CEREGE – Aix Marseille Université : UM34, CNRS UMR 7330,– France

<sup>3</sup> Institut de physique du globe de Strasbourg (IPGS) – université de Strasbourg, CNRS UMR 7516 – France

<sup>4</sup> De la Préhistoire à l’Actuel, Cultures, Environnement, Anthropologie (PACEA) –, U. Bordeaux, CNRS UMR 5199

La basse vallée de l’Omo est une région majeure pour l’étude de l’évolution des vertébrés du Plio-Pleistocene et des changements environnementaux contemporains (Boisserie et al., 2010). En raison d’un cadre géochronologique extrêmement bien contraint (120 niveaux de cinérites) et de conditions d’affleurement exceptionnelles, la formation de Shungura permet de décrypter l’enregistrement sédimentaire de l’évolution du système fluvio-deltaïque axial d’un bassin de rift. Elle est composée de sédiments clastiques (env. 800 m d’épaisseur) déposés dans une large variété d’environnements de dépôt, s’échelonnant du lac profond à la rivière en méandres, et couvrant la période de 3.6 Ma à 1 Ma.

Les travaux précédents sur la formation de Shungura font état d’une sédimentation fluviatile dominante interrompue par de courts épisodes lacustres (rarement plus de 100 ka) d’origine tectonique (De Heinzelin, 1983). Une nouvelle section levée en 2017 (600 m d’épaisseur, de 3.6 Ma à 1.76 Ma) dans l’Aire Type de Shungura, et correspondant au domaine proximal du système deltaïque, apporte un faisceau de nouvelles données pour reconstituer l’évolution du paléolac Turkana. Les environnements de dépôts sont interprétés en se fondant sur l’analyse des faciès sédimentaires. L’identification de surfaces remarquables et des motifs d’empilement conduit à mettre en évidence les tendances progradantes et rétrogradantes, pour reconstituer plusieurs cycles T-R. Ainsi, une plus grande partie de la séquence est attribuée à des faciès caractérisant des environnements deltaïques, ce qui implique la présence d’un lac dans le bassin de 3.7 Ma à 3.1 Ma. De plus, les méthodes de la stratigraphie séquentielle ont été utilisées afin d’analyser les séquences sédimentaires de l’épisode de dépôt fluviatile de la formation (de 3.1 Ma à 2.1 Ma). Deux surfaces d’erosion sont interprétées comme des chutes du niveau de base du système. Les remplissages de ces incisions, formés de corps sableux dits " multi-storey ", sont interprétés comme étant des dépôts fluviaux de cortèges de bas niveau et les dépôts sus-jacents présentant une dispersion des corps sableux dans des dépôts de plaine d’inondation sont attribués à des dépôts fluviaux de cortège de haut niveau. Les fluctuations du paléolac Turkana et les variations des apports sédimentaires dépendent de deux forçages principaux : le climat régional et l’activité tectonique du bassin. Nos données apportent des précisions sur les architectures sédimentaires développées dans la zone axiale d’un bassin de rift qui permettront d’évaluer l’influence de ces forçages au cours du temps.

Boisserie, J.-R., Delagnes, A., Beyene, Y., Schuster, M., 2010. Reconstructing the African back-ground to human expansions in Eurasia: New research in the Shungura Formation, Ethiopia. *Quatern. Intl.* 223e224, 426e428.

De Heinzelin, J., 1983. The Omo group: archives of the international Omo Research Expedition. *Musée royal de l’Afrique centrale, Tervuren*.

**Mots-Clés:** Rift Est, Africain, formation de Shungura, stratigraphie séquentielle, delta, paleolac Turkana



## Caractérisation pétro-géochimique et datation U/Pb du volcanisme contemporain des bassins d'âge fini-Carbonifère à Permien du Nord du Massif Central

Céline Ducassou <sup>\*ψ1</sup>, Sylvie Bourquin <sup>1</sup>, Pierre Pellenard <sup>2</sup>, Laurent Beccaletto <sup>3</sup>, Mathilde Mercuzot <sup>1</sup>, Camille Rossignol <sup>4</sup>, Marc Poujol <sup>1</sup>, Hallot Erwan <sup>1</sup>, Anne-Catherine Pierson-Wickmann <sup>1</sup>, Georges Gand <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Rennes (GR) – Université Rennes : UMR6118 – France

<sup>2</sup> Biogéosciences – Université de Bourgogne : UMR6282 – France

<sup>3</sup> BRGM – Bureau de Recherches Géologiques et Minières – France

<sup>4</sup> Universidade de São Paulo (USP) – Brésil

La formation de la chaîne hercynienne, dont l'apogée a lieu au Carbonifère, participe à l'assemblage de la Pangée, qui se démantèlera par la suite à partir du Trias. La limite Carbonifère-Permien correspond donc à une période clé dans l'évolution géodynamique globale, à la transition entre une période orogénique et une période de rifting. Cependant, les reconstitutions paléogéographiques et paléoclimatiques pour cette époque sont assez peu contraintes, notamment du fait du manque de datations radiométriques et de corrélations stratigraphiques fiables entre les différents domaines sédimentaires. Plusieurs bassins sédimentaires fini-carbonifères à permiens sont préservés à l'affleurement dans le Nord du Massif central (secteurs d'Autun, de l'Aumance, de Decize-la Machine). Ils ont régulièrement enregistré des événements volcaniques, soit explosifs (niveaux de cendres), soit effusifs (coulées volcaniques) intercalés dans les séries sédimentaires. Certains de ces événements ont pu être localement utilisés pour des corrélations au sein d'un même bassin, mais ne permettent pas de corrélérer les séries sédimentaires entre les différents bassins. Récemment, des données géochronologiques précises ont été obtenues pour le Bassin d'Autun (Pellenard et al., 2017, Gondwana Res., 51, 118-136). Le centre d'émission du volcanisme n'est pas identifié, mais le complexe rhyolitique de Montreuillon, au Nord-Ouest du Morvan et au Nord des bassins pourrait constituer un candidat potentiel. Les objectifs de ce travail sont (1) d'obtenir des datations radiométriques U/Pb supplémentaires pour les bassins d'Autun, de l'Aumance et de Decize-la Machine mais également pour le volcanisme de Montreuillon, et (2) de mieux caractériser et de comparer la nature pétrologique et géochimique des différents événements magmatiques.

**Mots-Clés:** géochronologie, carbonifère, permien, U/Pb, bassins, Massif Central, varisque, hercynien

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: celine.ducassou@gmail.com

## Différentes approches pour la datation U/Pb des tonsteins intercalés dans les séries continentales d'âge fini-carbonifère à permien de Lucenay-lès-Aix (Sud du Bassin de Paris, France)

Céline Ducassou <sup>\*1</sup>, Camille Rossignol <sup>2</sup>, Sylvie Bourquin <sup>1</sup>, Pierre Pellenard <sup>3</sup>, Laurent Beccaletto <sup>4</sup>,  
Marc Poujol <sup>1</sup>, Charline Hue <sup>1</sup>, Mathilde Mercuzot <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Rennes (GR) - Université de Rennes 1 : UMR6118 - France

<sup>2</sup> Universidade de São Paulo (USP) - Brésil

<sup>3</sup> Biogéosciences - Université de Bourgogne, CNRS : UMR6282 - France

<sup>4</sup> BRGM - France

D'une manière générale, la présence de niveaux volcaniques (cendres ou laves) intercalés dans les séries sédimentaires présente un avantage non négligeable pour dater la sédimentation de ces séries. Des datations précises peuvent même permettre d'estimer des taux de sédimentation, ou encore de proposer des corrélations à l'échelle de différents bassins.

Les séries sédimentaires du Carbonifère-Permien de Lucenay-lès-Aix, étudiées par forage, sont géographiquement situées entre des séries de même âge connues à l'affleurement : Decize-La Machine (au nord), Aumance (à l'ouest) et Autun (à l'est). Ce (ou ces) bassin(s) sont constitués de dépôts continentaux dans lesquels s'intercalent des niveaux de tonstein (i.e. dépôts de cendres volcaniques altérés en kaolinite en domaine continental). Or, le calage stratigraphique de ces séries est relativement mal contraint, rendant les corrélations entre les différentes zones de sédimentation incertaines.

Nous avons donc entrepris une analyse géochronologique sur les potentiels niveaux de tonsteins d'un forage carotté de Lucenay-lès-Aix (forage LY-F). Au préalable, des analyses minéralogiques (par diffraction des rayons X) et géochimiques (par ICP-AES et ICP-MS) ont été réalisées afin de confirmer l'origine volcanique de ces niveaux et d'identifier une possible contamination. Cinq échantillons ont été sélectionnés pour des analyses U/Pb (LA-ICP-MS) sur zircons. Les deux premiers échantillons, à la base du forage, permettent de calculer un âge Concordia à *c.* 299 Ma tandis que pour les trois autres échantillons, plus haut dans la série, la dispersion des analyses le long de la Concordia rend difficile la détermination d'un âge. Cette dispersion des données traduit à la fois une perte en Pb subie par certains grains, et la présence de grains hérités et/ou remaniés. Des analyses U/Pb (LA-ICP-MS) sur apatites ont également été réalisées sur ces trois échantillons. Les âges intercept calculés pour chacun des échantillons sont, compte tenu des erreurs calculées, identiques aux âges U/Pb sur zircons obtenus sur les échantillons de la base du forage. Des analyses en cours sur les séries contemporaines du Massif Central vont permettre d'obtenir d'autres âges, cette étude permettant d'ores-et-déjà de proposer de nouvelles stratégies pour améliorer la précision des résultats.

**Mots-Clés:** géochronologie, carbonifère, permien, U/Pb, bassins, Massif Central, varisque, hercynien

\*Intervenant

## Stratigraphie séquentielle et signature géochimique des cortèges de dépôt : Application aux accumulations de phosphate de l'Atlas marocain

Radouan El Bamiki <sup>\*1,2</sup>, Gilles Merzeraud <sup>2</sup>, Michel Séranne <sup>2</sup>, El Hassane Chellaï <sup>1</sup>, Fleurice Parat <sup>2</sup>, Jean-Louis Bodinier <sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Université Cadi Ayyad (UCA) - Faculté des Sciences Semlalia - Marrakech 40000 - Maroc

<sup>2</sup> Géosciences Montpellier (GM) - Université de Montpellier, Montpellier 34095 cedex 05 - CNRS : UMR5243 - France

<sup>3</sup> Geology and Sustainable Mining - UM6P, Ben Guerir, 43150 - Maroc

Le système atlasique marocain recèle de nombreuses accumulations de phosphate. Ces occurrences d'âge Crétacé supérieur-Paléogène, ont fait l'objet d'études de stratigraphie séquentielle et de géochimie dans le but d'élucider le comportement géochimique des faciès phosphatés au sein des différents cortèges de dépôt. Les coupes étudiées montrent une méga-séquence transgressiverégressive bornée par des discontinuités stratigraphiques : i) une surface karstique sous-jacente au cortège transgressif (*Transgressive Systems Tract*). ii) un niveau condensé constituant la base du cortège du haut niveau marin (*Highstand Systems Tract*). Ce dernier cortège de dépôt est caractérisé à sa base par la présence de niveaux de phosphorites passant progressivement à une alternance de phosphorites et carbonates au sommet.

19 échantillons ont été analysés pour leur contenu en éléments majeurs et traces, y compris les terres rares (REE). La normalisation des REE par rapport au PAAS montre des spectres caractéristiques de l'eau de mer avec un segment plat des terres rares lourdes, un appauvrissement en terre rares légères et une anomalie négative en Ce.

Les teneurs en REE des échantillons s'inscrivent dans un large champ de variation, avec un enrichissement en REE vers la partie supérieure du système du haut niveau marin, tandis que les teneurs en P2O5 montrent un champ de variation réduit. Cet enrichissement est probablement lié à l'évolution de la composition chimique de l'eau de mer pendant la baisse du niveau marin qui accompagne le cortège du haut niveau marin.

**Mots-Clés:** phosphate, géochimie, stratigraphie séquentielle, Atlas, Maroc

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>✉</sup>Auteur correspondant: red.el.bamiki@gmail.com

## Deux processus distincts d'accumulation du phosphate dans le système Atlasique du Maroc

Radouan El Bamiki <sup>\*ψ1,2</sup>, Michel Séranne <sup>2</sup>, Gilles Merzeraud <sup>2</sup>, El Hassane Chellaï <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Cadi Ayyad (UCA) - Faculté des Sciences Semlalia - Marrakech 40000 - Maroc

<sup>2</sup> Géosciences Montpellier (GM) - Université de Montpellier, Montpellier 34095 cedex 05 - CNRS : UMR5243 - France

Les accumulations de phosphate du domaine atlasique marocain, appartiennent à la province phosphogénique du Crétacé supérieur-Paléogène, qui s'étend de l'Afrique de l'Ouest jusqu'au Moyen Orient. Une dizaine de coupes ont été levées et échantillonnées dans cet intervalle le long des bordures du Haut Atlas au Maroc. La majorité des études antérieures se sont focalisées sur la phosphatogénèse. Cependant, dans la présente étude, une attention particulière est consacrée aux processus sédimentaires et biologiques permettant de dévoiler les contrôles géologiques sur l'accumulation et la préservation du phosphate dans l'enregistrement sédimentaire.

Les coupes étudiées montrent une méga-séquence transgressive-régressive et différents modes d'accumulation liés à différents contextes sédimentologiques. Les données du terrain et les analyses pétrographiques ont permis de mettre en évidence deux principaux faciès phosphatés:

-Un faciès de phosphate primaire formé in-situ. Ce faciès correspond à des marnes phosphatées finement laminées et composées principalement par des péloïdes phosphatés, cimentés par la calcite, la calcédoine et la dolomite. Ce faciès est communément lié au cortège sédimentaire de haut niveau marin et son apparition commence dès l'intervalle condensé, à la base du cortège.

-Un faciès de phosphate remanié qui se manifeste en trois modes distincts : i) un phosphate granulaire, recouvrant une surface karstique corrélée régionalement, et remplissant les cavités karstiques sur une profondeur de trois mètres. ii) un grès phosphaté piégé en arrière-shoal pendant les périodes transgressives. iii) un phosphate très grossier formé d'un mélange de particules phosphatées (coprolithes, débris d'os de vertébrés, dents de poissons) et de particules détritiques (quartz et lithoclastes centimétriques). Ce dernier mode est exclusivement rencontré au niveau de la partie la plus distale du transect étudié (dans le sud-ouest).

Les apports détritiques et les dépôts gravitaires sous-marin associés, évoquent un système de dépôt en plate-forme mixte, ouverte vers l'ouest à l'échelle régionale, mais qui présente des variations locales dans les conditions de sédimentation. Ces résultats suggèrent une paléogéographie complexe, avec des zones où la phosphatogénèse est dominante et des zones où les processus de remaniement prévalent.

**Mots-Clés:** phosphate, remaniement, accumulation, Haut Atlas, Maroc

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: red.el.bamiki@gmail.com

## Analyse faciologique et stratigraphie séquentielle haute résolution de la série syn-rift triasique du bassin de Mohammedia-Benslimane-ElGara-Berrechid (Meseta occidentale, Maroc)

Rachid Essamoud <sup>\*1,2</sup>, Abdelkrim Afenzar <sup>1/2</sup>

<sup>1</sup> Université Hassan II de Casablanca (UH2C) - Maroc

<sup>2</sup> Laboratoire de Dynamique des Bassins Sédimentaires et Corrélations Géologiques, Faculté des Sciences Ben M'Sik (LDBSCG) - Maroc

Le bassin triasique de Mohammedia-Benslimane-ElGara-Berrechid (MBEB) est situé au nord-ouest du Maroc, au niveau de la meseta côtière marocaine, à une vingtaine de kilomètres au nord-est de Casablanca et une dizaine de kilomètres au sud de Benslimane. Ce bassin se présente comme une vaste dépression peu profonde qui appartient à une structure en demi-graben de direction N-S à NE-SW, dont l'orientation géographique épouse la direction des structures majeures hercyniennes.

L'analyse sédimentologique détaillée a montré que pendant la phase syn-rift triasique, le bassin de MBEB est caractérisé par un remplissage sédimentaire détritique et évaporitique. Une diminution progressive constatée de la paléopente avec le temps, a conduit à l'évolution des paléoenvironnements pendant ce remplissage d'un système proximal avec de cônes alluviaux à un système fluviatile en tresse, puis à un système anastomosé. Ces environnements évoluaient finalement à une plaine alluviale associée à une plaine côtière où s'étaient développées des playa lakes, des mudflats et des lagunes. Les faciès halitiques purs et massifs du sommet de la série indiquent probablement une évolution de l'environnement de dépôt vers un milieu subtidal peu profond. La présence de ces évaporites indique un climat qui a favorisé leur précipitation, en l'occurrence un climat assez chaud.

L'interprétation de cette série en terme de stratigraphie séquentielle haute résolution a permis la mise en évidence de quatorze unités génétiques caractérisant des environnements continentaux et de transition, voire subtiaux peu profonds. Ces unités sont englobées dans quatre cycles mineurs de progradation-rétrogradations (empilements d'unités génétiques), eux-mêmes groupés dans un cycle majeur. Ces progradations-rétrogradations sont manifestement liées à la variation du niveau de base. La dominance des phases de rétrogradations donnant une allure asymétrique aux cycles est liée à la prédominance des montées du niveau de base. Ces variations sont probablement d'origine allocyclique: (tectoniques et/ou climatiques, en relation avec la Téthys et l'océan atlantique en cours d'ouverture). Les corrélations à l'échelle du bassin ont permis de mettre en évidence des variations latérales des épaisseurs des unités génétiques et des passages latéraux de faciès au sein de chaque cycle mineur de Progradation/Rétrogradations. Ces variations sont probablement liées à la subsidence suffisamment forte dans le bassin.

**Mots-Clés:** Sédimentologie, Faciès, Paléoenvironnements, Stratigraphie séquentielle haute résolution, Trias, Rifting

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>1/2</sup>Auteur correspondant: karim.afenzar@gmail.com

## The Lower Orleanian Continental Sands from the Savigné-sur-Lathan/Noyant-sous-le-Lude Basin (Anjou-Touraine, France) : Sedimentology, Biostratigraphy and Paleoenvironment

Cyril Gagnaison <sup>\*1</sup>, Marina Cabidoche <sup>1</sup>, Rosine Riera <sup>2</sup>, Mathieu Dechamps <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut polytechnique UniLaSalle Beauvais (UniLaSalle/ Equipe B2R) – France

<sup>2</sup> The University of Western Australia (UWA) – Australie

The sedimentary basin of Savigné-sur-Lathan/Noyant-sous-le-Lude (South-West of the Paris Basin, Anjou-Touraine, France) contains abundant outcrops of Upper Burdigalian and Tortonian (Miocene) shelly sands. Their excavation locally reveals the presence of Orleanian (Miocene) continental siliciclastic sandstones; which are overlying Aquitanian-Agenian lacustrine limestones. This sandstone has been known for its high content of Miocene fossil vertebrates since the twentieth century, and an abundant literature describes the 40 vertebrate taxa it contains: 3 Osteichthyes, 4 Reptilia and 33 Mammalia (Ginsburg, 2001; Gagnaison, 2013). The key taxon are: *Eucricetodon infralactorensis*, *Amphicyon lathanicus*, *Brachyodus onoideus* and *Ligeromeryx praestans*. This taxonomic assemblage is characteristic of the MN3 biozone (lower Orleanian, Burdigalian). Since 2012, new observations of this sandstone were realised on seven man-made outcrops: in Anjou (Pontigné, La Guimardière, Les Bleuets, Dénezé-sous-le-Lude, Le Bois à la Dame) and in Touraine (La Régnerie, Pont-Boutard). The observations were compiled on sketches and sedimentary logs, bed orientation measurements were realised, and 117 samples were collected. Diverse analysis were performed in the geological laboratory of UniLaSalle: microscopic and granulometric analysis, mineralogical analysis (DRX) and visual descriptions of grain morphology with SEM (Scanning Electron Microscope). The study reveals the existence of three facies: a cross-bedded clayey sandstone, a clayey sandstone and a red sandstone. The cross- bedded clayey sandstone is made of a poorly sorted, clayey sandstone composed of sub-angular quartz grains whose surface is covered with percussion marks. It forms fining-upward decimetric cross-bedded to parallel laminated beds with an erosive base. The beds show lateral accretion processes, and clay lenses are common. It is interpreted as the active channel from a small and energetic stream. The clayey sandstone with root marks contains a mix of green clay, fine to medium angular quartz grains and coarse-grained rounded quartz grains. The red sandstone is mainly composed of medium to coarse quartz grains with clay lens, ferruginous nodules and white pedogenetic nodules. This suggests that an energetic river canalized by the Evre syncline was flowing NW-SE during the Orleanian. It was surrounded by floodplains which were dried out during ephemeral arid periods.

**Mots-Clés:** Paris Basin, Anjou, Touraine, Miocene, Orleanian, MN3, fossil vertebrate, floodplains

\*Intervenant

## Répartition des faciès continentaux syn-tectoniques dans un bassin d'avant-pays (Bassin de Jaca, Espagne)

Pierre-Alexandre Grignard <sup>\*ψ1</sup>, Cédric Bonnel <sup>1</sup>, Charles Aubourg <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs (OROGEN, E2S-UPPA, Total, CNRS, LFCR-IPRA) - Université de Pau et des Pays de l'Adour - UPPA (FRANCE) - France

L'avant-pays sud pyrénéen est considéré comme un exemple typique de " fold & thrust belt " où la structuration du prisme d'accrétion provoque l'exhumation des sédiments de la couverture. Dans le bassin de Jaca, la collision continentale engendre la déformation du socle qui se propage dans les séries du Crétacé au Miocène. La source des sédiments qui remplissent le synclinal de Guarga provient en partie du nord à la suite de l'exhumation et de l'érosion de la zone interne et du bassin " piggy-back " turbiditique d'Hecho. Les faciès les plus proximaux de la formation continentale du Campodarbe consistent en des cônes alluviaux qui se répartissent au nord du synclinal de Guarga. La structuration d'est en ouest et de courte longueur d'onde associée à ces dépôts serait responsable de la répartition spatiale et temporelle des systèmes alluviaux. En se basant sur la reconstruction de la déformation de la bordure nord du synclinal de Guarga, d'un ensemble de logs stratigraphiques et d'une carte des paléocourants, nous proposons un modèle de répartition des faciès continentaux de la formation syn-orogénique du Campodarbe. La transition entre la sédimentation marine (Fm Belsué-Atarés) et les dépôts continentaux (Fm Campodarbe) est ici caractérisée par l'interaction entre deux sources sédimentaires. L'expression de cette interaction correspond à la mise en place de la première sous-unité continentale en provenance du nord du bassin, le cône alluvial de Santa Orosia reposant sur les séries deltaïques (fm. Belsué-Atarés) alimenté de l'est au niveau de l'anticlinal syn-sédimentaire de Yebra de Basa. La seconde sous-unité est celle de Cancias, discordante sur l'unité de Santa Orosia. Les sédiments conglomératiques, venant également du nord, qui constituent ce cône alluvial migrent vers l'ouest à la faveur de la réactivation de l'anticlinal de Yebra de Basa. Simultanément au système de Cancias, le cône alluvial de la Peña Oroel se met en place à l'ouest en discordance sur les faciès distaux associés au cône de Santa Orosia. Ce corps sédimentaire est délimité au sud par l'anticlinal d'Atarés dont la structuration semble débuter avant le dépôt des séries continentales et s'intensifier jusqu'à la mise en place d'une dernière sous-unité conglomératique plus à l'ouest : Le cône alluvial de San-Juan de la Peña dont les géométries en strates de croissance témoignent de l'activité syn-sédimentaire de l'anticlinal d'Atarés.

**Mots-Clés:** Bassin d'avant-pays, Dépôts alluviaux, Tectonique syn-sédimentaire, Stratigraphie continentale

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: pierrealexandregrignard8@gmail.com

## Etude sédimentologique des sondages d'Okouma dans le bassin de Franceville (Gabon)

Grace Guiyeligou <sup>\*1</sup>, Abderrazak El Albani <sup>1</sup>, Alain Trentesaux <sup>2</sup>, Jean-Yves Reynaud <sup>2</sup>,  
Olabode Bankole <sup>1</sup>, Raphaël Pakta <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut IC2MP 7285 CNRS-INSU, Université de Poitiers, 86022 Poitiers, France – France

<sup>2</sup> Université de Lille, Laboratoire – France

<sup>3</sup> Directeur mines eramet-Comilog – Gabon

Le bassin de Franceville au Gabon est un bassin d'âge Paléoprotérozoïque. Il a été depuis longtemps étudié pour son importance économique (Fe, U, Mn) et plus récemment parce qu'il renferme les plus vieux fossiles de macro-organismes multicellulaires, ce qui a donné lieu à un regain d'intérêt pour les conditions géochimiques des environnements sédimentaires de ce bassin. Des concentrations importantes de manganèse sont présentes dans des black shales carbonatés de l'unité FB dont l'altération supergène constitue le mineraï exploité sur le plateau de Bangombé depuis 1962. Le plateau voisin d'Okouma, non encore exploité, est distant de seulement 5 km du plateau de Bangombé et présente le même potentiel économique. L'étude détaillée de sept forages récents du plateau d'Okouma montre toutefois des différences, comme la présence d'un niveau riche en fer (jusqu'à 51% de FeO<sub>3</sub>) et en phosphore (jusqu'à 8,31% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) à la base du protore manganifère. Ce dépôt a un faciès laminé, où alternent des lames sombres de carbonates (dolomie, ankérite, sidérite et rhodocrosite) et des lames de chert blanc. Cette lamination présente des morphologies stromatolitiques et localement des dislocations dans des brèches intraformationnelles. Une anomalie positive en cérium suggère des conditions de dépôt dans un environnement anoxique. Les corrélations entre ces faciès et leurs équivalents à Bangombé suggèrent que les variations redox dans le bassin contrôlent les transitions proximal-distal (Bangombé-Okouma) et le passage de la zone ferrifère et phosphorée au protore manganifère dans un continuum transgressif.

**Mots-Clés:** Bassin sédimentaire, phosphore, zone ferrifère, carbonates, variation redox

\*Intervenant

## Stratigraphie et architecture sédimentaire d'un bassin molassique miocène d'avant-pays: le Bas-Dauphiné septentrional

Bastien Huet <sup>\*1</sup>, Jean-Loup Rubino <sup>\*</sup><sup>2</sup>, Amir Kalifi<sup>φ2</sup>, Jeremie Gaillot<sup>§2</sup>, Frédéric Ricciardi<sup>¶2</sup>, Jean-Yves Reynaud<sup>†3</sup>

<sup>1</sup> Département Sciences de la Terre, M2 GEOBAS, Université de Lille – Cité Scientifique, Batiment SN5 - 59655 Villeneuve d'Ascq – France

<sup>2</sup> TOTAL CSTJF – Avenue Larribau, 64000, Pau – France

<sup>3</sup> Département Sciences de la Terre, LOG UMR 8187, Université de Lille – Cité Scientifique, Batiment SN5 - 59655 Villeneuve d'Ascq – France

La géologie des bassins miocènes du sud-est de la France est généralement bien connue. De nombreuses études se sont depuis longtemps intéressées à la mise en place et à l'histoire du remplissage de ces bassins. Seule la partie septentrionale du Bas-Dauphiné reste à ce jour mal documentée. En effet, et malgré la réalisation de différents projets de recherche dans ce secteur au cours des dernières décennies, aucune analyse sédimentologique de détail n'a été effectuée sur cette partie du bassin molassique d'avant-pays située dans la partie nord de la vallée du Rhône, enclavée entre le Massif central et les chaînons subalpins. Dans ce contexte, on propose ici une nouvelle étude sédimentologique de la série miocène (pour l'intervalle Burdigalien/Messinien) du Bas-Dauphiné septentrional, basée sur l'exploitation des données disponibles dans la zone et sur de nouveaux travaux effectués récemment à partir des méthodes modernes d'analyses de faciès, de stratigraphie séquentielle et de biostratigraphie. Cette étude inclut l'élaboration d'un modèle de faciès complet et de coupes de terrain afin de caractériser les formations affleurantes et la réinterprétation de données de puits et de lignes sismiques issues de différentes campagnes de prospection afin de caractériser les séries profondes. Le travail de terrain a permis la réalisation de neuf coupes sédimentaires et la détermination de trois associations de faciès majeures connectées d'amont en aval: un système fluviatile distributif, un système deltaïque fluvial-dominé et un système de dépôts littoraux et marins inter et subtidaux. L'analyse des données de puits et des lignes sismiques a révélé la structure interne de la zone d'étude, permettant notamment d'observer la morphologie très irrégulière du socle anté-miocène ayant contrôlé le remplissage sédimentaire diachrone et progressif, la disposition et l'enchaînement séquentiel des couches miocènes mais également leur contact dans la partie orientale du bassin avec les chainons subalpins et l'héritage du rifting téthysien (Ile Crémieu). Finalement, l'ensemble des données a permis l'élaboration d'un modèle de remplissage au Miocène au travers de neuf séquences de dépôt, réparties entre le Burdigalien et le Tortonien et replacées dans le cadre stratigraphique connu régionalement. La nature des dépôts évolue depuis des formations marneuses à la base (Séquences 1 et 2), des formations sablo-conglomératiques marines et deltaïques (séquences 3, 4, 5 et 6), et des formations conglomératiques exclusivement fluviatiles au sommet (séquences 7, 8 et 9).

**Mots-Clés:** bassin sédimentaire, bassin d'avantpays, Miocène, sédimentologie, stratigraphie séquentielle, biostratigraphie

<sup>\*</sup>Intervenant

## Understanding the Stratigraphic Architecture and Facies Evolution in a Gravity Driven System, Offshore Western Niger Delta, Nigeria

Kelvin Ikenna Chima <sup>\*ψ1</sup>, Damien Do Couto <sup>1</sup>, Estelle Leroux <sup>2</sup>, Marina Rabineau <sup>3</sup>, Didier Granjeon <sup>4</sup>,  
Nick Hoggmascall <sup>5</sup>, Silvia Gardin <sup>6</sup>, Christian Gorini <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne Université-Institut des Sciences de la Terre UMR 7193, Paris (France) (iSTEPI) – Université Pierre et Marie Curie - Paris 6,CNRS: UMR7193 – France

<sup>2</sup> Ifremer – Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), France

<sup>3</sup> Laboratoire Géosciences Océan (LGO) – Université de Bretagne Sud, Université de Brest, Centre National de la Recherche Scientifique – Laboratoire Géosciences Océan - CNRS UMR 6538 - Institut Universitaire Européen de la Mer, rue Dumont d'Urville, 29280 PLOUZANÉ, France

<sup>4</sup> Institut Français du Pétrole, Energies Nouvelles (IFPEN) – IFP Energies Nouvelles – 1-4 Avenue du Bois Préau, 92852 Rueil-Malmaison, France

<sup>5</sup> Shell Petroleum Development Company of Nigeria (SPDC) – Nigéria

<sup>6</sup> Centre de Recherche sur la Paléobiodiversité et les Paléoenvironnements (CR2P-UMR 7207) – CNRS-MNHN-SU – Sorbonne Université, case 104, 4 Place Jussieu 75252 Paris Cedex 05, France

The Cenozoic Niger Delta is a classic shale tectonic province affected by gravity spreading, mud volcanoes and pockmarks due to overpressured marine shales detaching from decollement levels. Previous studies utilizing shallow seismic profiles have described the depositional architecture in the western upper slope of the Niger Delta. However, lack of borehole data prevented seismic facies calibration and investigation of the interaction between sedimentation and shale tectonics. We applied seismic and sequence stratigraphy, and 3-D geomorphological analysis on a high-resolution 3-D seismic block as well as biostratigraphic analysis on borehole data to characterize the depositional architecture in ponded basins. Regional seismic interpretation reveal extensional growth faults and compressional structures resulting from overpressured shale displacement. We were able to identify major erosional unconformities in the Serravallian (~13.1 Ma), Tortonian (~9.5 Ma), Messinian (~5.3 Ma) and Pliocene (~3.8 Ma) thanks to a reappraisal of the biostratigraphic content of key boreholes. The resulting depositional architecture include MTCs and turbidite deposits subsequently draped by hemipelagites, characterized by abundance and diversity of planktonic foraminifera and calcareous nannofossils. While the thicker and laterally extensive MTCs were probably derived from the shelf-margin, the thinner, laterally confined MTCs are derived from mud volcano activities. Spatial thickness analysis reveals that the mobile shale activity in the study area started during the Late Oligocene-Early Miocene (24.4-20.4 Ma) with periods of intense activity until the Quaternary. Rapid sedimentation during the Tortonian and Messinian appears to have triggered upward movement of the northeast mobile shale resulting to multiple volcanoes and pockmarks visible on the present seabed.

**Mots-Clés:** Niger Delta, Shale tectonics, Gravity system, Mud volcanoes, turbidites, chronostratigraphy, Ponded basins

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: kelvini.chima@gmail.com

## Onset of the Convergence between Europe and Iberia: Well correlation and seismic interpretation within the Upper Cretaceous of the Aquitaine Basin

Benoît Issautier <sup>\*</sup>, Eric Lasseur <sup>\*1</sup>, Olivier Serrano <sup>2</sup>

<sup>1</sup> BRGM -Orléans, France

<sup>2</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (Brgm) – BRGM – France

The onset of convergence between Iberia and Europe is well documented in the southern Pyrenees with the development of early Boixol-Turbon thrusts during the Late Santonian-Campanian. Evidences of compressive deformations are scarcer in the Aquitaine basin that will become the north Pyrenean foreland. Evidences of Campanian compression age are known in the Corbières with the installation of a deep turbiditic basin but the timing and style of the first compressive deformation are poorly characterized in most of the basin. Following the Albian rifting, the Aquitaine basin is segmented during Late Cretaceous in two main parts: a poorly subsiding northern margin (North Aquitaine Platform) where carbonate platform develops; and a southern portion where distal pelagic to turbiditic sedimentation takes place. Locally, the Albian extension stage and early Cretaceous salt diapirs created 'ridges' that were partly inverted during compression.

This study relies on well log- and seismic profiles interpretations, and it provides a refined stratigraphy of Upper Cretaceous deposits; helping to understand the main deformation stages occurring within the upper Cretaceous. The results show a relative isopach Cenomanian-Turonian cycle with progressive platform basin transition (except in the southeastern part where probable steep inherited normal fault controls the transition). It materializes a quite stable post-rift thermal subsidence stage following Albian extension.

The Coniacian-Santonian marks a differentiation stage between platform and basin with sharp increased thicknesses of dominantly turbiditic material in the basin while sedimentation is condensed to absent in the platform area. This pattern traduces a change in the deformation regime while truncations over some ridges and Celtic-Aquitaine, suggest early inversion. A general deepening of the basin marks the Campanian period and the installation of a very thick turbiditic succession in the southern part, which is interpreted as the first flexural basin, secondly overthrust during Eocene deformation. The Campanian deposits rests unconformably over deformed area suggesting migration of the forebulge. Finally, the Maastrichtian corresponds to a pronounced onlap on the foreland, large scale infilling and thickness homogenization, which suggests the end of this former flexural basin and onset of a relatively quiet period that lasted during Paleocene. These results were acquired during the Gaia project founded by TIGF, BRGM and Agence de l'Eau Adour/Garonne.

**Mots-Clés:** Iberia, Europe convergence, Upper Cretaceous, Aquitaine Basin

<sup>\*</sup>Intervenant

## Early Cretaceous incised-valley fills, exposed in the eastern margin of the Congo basin (central south Atlantic rifted-margin): origin, depositional environments and sequence stratigraphy

Sage Kebi-Tsoumou <sup>\*1</sup>, François Guillocheau <sup>\*1</sup>, Cécile Robin <sup>\*1</sup>, Julien Bailleul <sup>\*2</sup>,  
Vincent Delhayé-Prat <sup>\*3</sup>

<sup>1</sup> Geosciences-Rennes, UMR 6118 Université de Rennes1-CNRS – CNRS UMR 6118 - France

<sup>2</sup> Institut polytechnique UniLaSalle, Basins-Reservoirs-Resources (B2R), Geosciences Dpt

<sup>3</sup> TOTAL EP – TOTAL, CSTJF, Pau – France

The Congo basin in south of republic of Congo displays well-exposed marginal incised-valley filled during the early post-rift stage of central south Atlantic rifting, which remain poorly studied. This current study focusses on morphology, sedimentological and stratigraphic architectural of these incised-valleys based on detailed field mapping and topography DEM analysis. Three NE-SW extending incised-valleys (known as Doumanga, Nkougni and Mboubissi incised-valley systems) were mapped in the study area, cutting into the Precambrian basement rocks (Mayombe belt) and separated each and other by ridge of basement rocks. These incised-valley systems exhibit dendritic-to-trellis morphology pattern and U-shape. Their location and morphology pattern are thought to be controlled by the basement tectonic features and lithology heterogeneity. They are interpreted as river incisions as results of base level fall in response to late rift tectonic uplift or early post-rift flexural uplift and subsequently back-filled by the Aptian nonmarine siliciclastic sediments (related to the upper member of the Chéla Formation (known as Vembo) as lake level rose in response of regional transgression in central south Atlantic. Detailed sedimentological analysis of well-exposed outcrops of Aptian infilling succession led to define distinct six main facies type (conglomerate, structureless to graded sandstone, laminated sandstone and silt, and organic-rich shale, containing abundant continental plant debris and coal), to infer the depositional processes from debris flows to hyperpycnal turbidity currents and finally to interpret the paleoenvironment of the Chéla Formation in the study area. The vertical and lateral variations of these facies record the evolution of flood-dominated lacustrine fan delta and related distal turbidites. The Aptian valley fill succession (ca. 60m-thick) form a onlapping transgressive depositional sequence bounded by Subaerial unconformity (correlated with regional extensive Pre-Chéla unconformity) and arranged internally in dominantly fining-upward vertical stacking patterns and minor coarsening-upward stacking pattern. This study provides new insights into the morphology pattern and origin of marginal valley-fills of the Congo basin and the paleogeography and sequence stratigraphy framework of the Aptian Chéla Formation (sag succession).

**Mots-Clés:** South Atlantic Rifted, margin, Sag succession, Chéla Formation, Incised valley, fill, Lacustrine deltas

<sup>\*</sup>Intervenant

## Pourquoi ne retrouve-t-on plus de bauxites au Crétacé supérieur dans le Languedoc ?

Emilie Marchand <sup>\*1,2</sup>, Emmanuelle Chanvry <sup>3</sup>, Gwenn Le-Saout <sup>4</sup>, Michel Lopez <sup>2</sup>, Michel Séranne <sup>2</sup>,  
Marc Vinches <sup>1</sup>

<sup>1</sup> IMT Mines Alès - Université de Montpellier - LGEI - France

<sup>2</sup> Université de Montpellier - Géosciences Montpellier - France

<sup>3</sup> Université de Poitiers - IC2MP - France

<sup>4</sup> IMT Mines Alès - Université de Montpellier - C2MA - France

Les bauxites du sud de la France soulignent une période de continentalisation, sous un climat tropical humide fortement hydrolysant favorable à la formation de kaolinite et d'hydroxydes d'alumine. L'analyse sédimentologique de la série bauxitique et de sa couverture dans le bassin de Villeveyrac (Hérault) permet de mieux contraindre les processus de genèse de la bauxite et les conditions du retour à une sédimentation terrigène, en précisant les rôles respectifs du climat et de l'accommodation dans la disparition des conditions favorables à la bauxitisation. L'analyse détaillée (sédimentologie, géochimie, minéralogie) de deux forages carottés (84m et 184m) est complétée par une étude de son architecture stratigraphique à l'affleurement et dans les travaux miniers.

A la base, la bauxite repose en discordance sur un paléolapiaz qui affecte les mudstones du Malm. Le réseau de fractures dans les carbonates du mur est partiellement élargi et rempli par des silts bauxitiques vadoses rouges. L'intervalle bauxitique montre sur environ 6,5 m de puissance 3 séquences massives superposées qui soulignent le remaniement catastrophique de cuirasses bauxitiques primaires par des écoulements gravitaires ou de haute densité. La transition avec le toit correspond à une bauxite microconglomératique riche en kaolinite. Elle est surmontée par une argilite bariolée à traces de racines et nodules carbonatés. La série du toit montre sur plus de 180m une alternance d'argilites silteuses et de grès fins bien triés à terriers de type *Teichichnus* où alternent des cycles d'émergence et d'inondation que l'on rapporte à un environnement par- alié à deltaïque.

Les teneurs en aluminium diminuent au-dessus de la bauxite tout en restant élevées (40%), ce qui suggère que l'arrêt de la bauxitisation n'est pas lié à un changement de la source en aluminium. Par ailleurs, une étude de DRX a montré que les argilites silteuses de la succession paralique indiquent une évolution depuis une association dominée par la kaolinite à la base, jusqu'à une association dominée par la smectite vers le sommet.

Cette évolution traduirait une montée générale du niveau de base relatif avec l'ennoiement du karst bauxitique qui limiterait les conditions de drainage et de démantèlement de la cuirasse primaire. La préservation du système paralique sur au moins 180m témoignerait d'un taux de subsidence constant, avec un équilibre entre l'accommodation et l'apport sédimentaire.

**Mots-Clés:** bauxite, sédimentologie, paléoclimat, DRX, Fluorescence X

<sup>\*</sup>Intervenant

## Datation U-Pb des zircons détritiques des bauxites allochtones du Crétacé dans le Languedoc (Sud de la France): traçage de sources et implications géodynamiques

Emilie Marchand <sup>\*1,2</sup>, Michel Séranne <sup>2</sup>, Olivier Bruguier <sup>2</sup>, Marc Vinches <sup>1</sup>

<sup>1</sup> IMT Mines Alès - Université de Montpellier - LGEI - France

<sup>2</sup> Université de Montpellier - Géosciences Montpellier - France

Dans le sud de la France, les dépôts carbonatés du Jurassique et du Néocomien, correspondant à la subsidence thermique de la marge Téthysienne, sont brutalement interrompus par une inversion tectonique. Celle-ci est caractérisée par l'érosion, la karstification des calcaires et le dépôt de bauxites (" Isthme Durancien "). Pendant ce hiatus (Jurassique au Crétacé moyen) surviennent plusieurs évènements géodynamiques régionaux (rifting et exhumation du manteau dans les Pyrénées, dénudation du sud du Massif Central, subsidence des bassins Pyrénéens et sud-Provençaux). L'étude des bauxites languedociennes situées à la jonction de ces différents domaines, apporte des contraintes sur la chronologie et la géodynamique régionale au Crétacé moyen.

Trois bassins bauxitiques (Bédarieux, Villeveyrac et Cambelliès) ont été échantillonnés, suivant un transect Montagne Noire - Méditerranée. Les datations U-Pb réalisées par LA-ICP-MS sur 671 zircons détritiques ont révélés une proportion importante de zircons d'âge Hercynien et Protérozoïque. La proportion de zircons hercyniens diminue en s'éloignant de la Montagne Noire. Les zircons Protérozoïques indiquent plusieurs pics au Néo-, Méso- et Paléo-Protérozoïque, similaires dans les trois bassins échantillonnés. Ces observations mettent en évidence une source locale Hercynienne proche de la Montagne Noire et une source généralisée à l'ensemble des bassins. Cette dernière correspond au recyclage de séries sédimentaires fournissant les zircons les plus anciens. L'âge de l'intervalle bauxitique est contraint par les plus jeunes zircons analysés (113-118Ma) et l'âge Vraconien de la couverture des bauxites.

Ces résultats confirment l'existence d'une couverture sédimentaire Valanginien-Hauterivien sur le socle varisque de la Montagne Noire et le Jurassique. Cette couverture a été altérée et progressivement dénudée pendant l'Albien. Les bauxites du Languedoc ont été déposées au niveau de base, entre les zones en surrection du sud du Massif Central et de l'Isthme Durancien d'une part et le rift des Pyrénées et les bassins sud Provençaux d'autre part.

**Mots-Clés:** Erosion, Provenance, Bauxites, Isthme Durancien, Montagne Noire, Crétacé moyen

<sup>\*</sup>Intervenant

## Analyse comparée de la fracturation du mur avec la puissance minéralisée dans les karsts bauxitiques Crétacé inférieur du Bassin de Villeveyrac (S. France)

Emilie Marchand <sup>\*<sup>1,2</sup></sup>, Michel Séranne <sup>2</sup>, Michel Lopez <sup>2</sup>, Marc Vinches <sup>1</sup>

<sup>1</sup> IMT Mines Alès - Université de Montpellier - LGEI - France

<sup>2</sup> Université de Montpellier - Géosciences Montpellier - France

Les systèmes karstiques sont fréquemment organisés selon les directions principales de fracturation. En effet, la dissolution des carbonates est facilitée par la circulation de l'eau à travers le réseau fracturé du massif calcaire ; en particulier au noeud de la maille de fracturation où se forment des cavités les plus importantes. L'étude de la fracturation renseigne donc sur la géométrie des structures karstiques et de leur remplissage.

Le Jurassique supérieur de la région de Montpellier qui constitue le mur de la bauxite du bassin de Villeveyrac été karstifié à plusieurs reprises depuis le Crétacé ; en particulier, au cours de la phase de bauxitisation du Crétacé inférieur. Les bauxites karstiques, sont recouvertes d'une série argilo-gréseuse d'âge Crétacé supérieur à Eocène inférieur. Les travaux miniers et les affleurements disponibles ont révélés la structuration du mur Jurassique karstifié. Il s'agit d'alignements de pinacles plurimétriques sur des distances kilométriques, orientés préférentiellement N150 ( $\pm 10^\circ$ ) et N050 ( $\pm 10^\circ$ ). Ces directions sont aussi observées à l'échelle microtectonique (fentes de tension et miroir de failles striés) où l'on a pu mettre en évidence un évènement extensif NW-SE, antérieur à la compression pyrénéenne, jamais décrit dans la région. La bauxite présente ainsi une épaisseur variable en fonction de la géométrie du karst qui la contient.

Depuis 1960, 1385 forages d'exploration ont été réalisés à travers le bassin. Dans le cadre de ce travail, nous avons actualisé la base de données de l'ensemble de ces sondages qui permet de préciser la distribution spatiale de la puissance minéralisée par traitement géostatistique. Ainsi l'analyse de variogrammes directionnels, permet de relier l'ouverture des fractures avec l'épaisseur du remplissage bauxitique. Cette corrélation devrait servir de guide pour les futures explorations et exploitations de la minéralisation.

**Mots-Clés:** Erosion, Provenance, Bauxites, Isthme Durancien, Montagne Noire, Crétacé moyen

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>✉</sup>Auteur correspondant: emilie.marchand@mines-ales.fr

## Efficacité des systèmes carbonatés: de la plate-forme à l'ultra-deep

Thierry Mulder <sup>\*1,2</sup>, Hervé Gillet <sup>1,2</sup>, Vincent Hanquiez <sup>1,2</sup>, Emmanuelle Ducassou <sup>1,2</sup>,  
 Audrey Recouvreur <sup>1,2</sup>, Kelly Fauquembergue <sup>1,2</sup>, Elsa Tournadour <sup>1,2</sup>, Johan Le Goff <sup>3</sup>, John Reijmer <sup>3</sup>,  
 Natacha Fabregas <sup>1,2</sup>, Borgomano Jean <sup>4</sup>

<sup>1et2</sup>Université de Bordeaux (UB) – UMR 5805 Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux

<sup>3</sup>King Fahd University of Petroleum Minerals, College of Petroleum Engineering Geosciences - Arabie saoudite

<sup>4</sup>CEREGE - Aix Marseille Université : UM34 - France

Les données récentes des missions Carambar améliorent la compréhension des systèmes carbonatés depuis la zone de production jusqu'à la plaine abyssale (*ultra-deep-carbonates*). Deux systèmes extrêmes (*end-members*) peuvent être identifiés en fonction du type de sédiment transporté (boue ou sable carbonaté) et de la taille du système turbiditique qui s'est développé dans la partie la plus profonde. Le système *Little Bahama Bank* (LBB) - *Great Abaco Canyon* (GAC) est un système de faible efficacité dominé par la boue. La production sur la plate-forme est exportée, soit par *density cascading*, soit par *tidal flushing*. Dans le premier cas, les particules fines sont piégées dans un prisme de haut niveau (*onlapping wedge*). Dans le second cas, seules les particules fines sont exportées au-delà des passes tidales. Les particules grossières forment des barres qui construisent des deltas de marée carbonatés mais les faibles pentes du LBB empêchent leur transfert au-delà. Une partie de la fraction fine atteint tout de même les petits canyons de la pente inférieure jusqu'à 1200 m de bathymétrie et va finalement s'épandre pour former des accumulations qui s'apparentent à des lobes. Néanmoins, il semble qu'une bonne partie de cette fraction fine soit piratée par les courants de surface qui maintiennent une activité jusque vers 800 m de profondeur d'eau. Ainsi, durant l'actuel, peu de sédiment issu de la plate-forme arrive dans la vallée de *Great Abaco* puis dans le GAC après le passage du *Blake Bahama Escarpement*. L'essentiel est apporté latéralement par glissement transrégionnels affectant les contourites situées sur le *Blake Plateau*, au N du canyon. En outre les courants profonds tels que le *Western Boundary UnderCurrent* (WBUC) prélevent une partie des sédiments fins. Le système d'*Exuma* est beaucoup plus efficace. Les fortes pentes au niveau d'*Exuma Sound* (ES) permettent au matériel grossier chenalisé dans les passes tidale de la plate-forme d'être exporté au-delà de la bordure de plate-forme et d'atteindre la pente. Là, elles alimentent des courants de turbidité dans *l'Exuma Valley* qui traverse ES puis *Exuma Plateau*. A ce niveau, la vallée est confinée entre les pentes abruptes des cays et des îles qui l'alimentent également en éléments grossiers. Après le passage du *Blake Escarpement*, les courants alimentent une levée turbiditique en éventail qui s'étale sur la croûte de la plaine abyssale de San Salvador. Le système est alors constitué de dépôts en masse grossiers avec de nombreuses figures d'érosion ou de dépôt sédimentaires. En outre, l'activité attestée sur le fond de la WBUC à cet endroit suggère la possibilité d'interactions entre processus *downslope* et *alongslope*. Les données parcellaires recueillies sur le système de Little Abaco Canyon montrent que ce dernier est à forte efficacité en raison de la connexion directe plate-forme-Canyon. Dans tous les cas, l'efficacité des systèmes carbonatés semble liée au type de matériel produit et exporté, au type de bordure de plate-forme et à la morphologie de la pente.

**Mots-Clés:** Carbonates profonds, turbidites, canyons, Bahamas, contourites

Intervenant

## From the Ophiolite obduction in Oman to the Makran subduction zone: the tectono-stratigraphic evolution of the Gulf of Oman

Dia Ninkabou <sup>\*ψ1</sup>, Philippe Agard <sup>1</sup>, Christian Gorini <sup>1</sup>, Bilal Haq <sup>1</sup>, Jeroen Smit <sup>2</sup>, Charlotte Nielsen <sup>3</sup>, Mathieu Rodriguez <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTeP) – Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7193 – France

<sup>2</sup> Utrecht University, Department of Earth Sciences – PO Box 80.021, 3508 TA Utrecht, Pays-Bas

<sup>3</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (TOTAL SA) – TOTAL – France

<sup>4</sup> Laboratoire de géologie de l'ENS (LGE) – INSU, CNRS : UMR8538, École normale supérieure [ENS] - Paris - 24 Rue Lhomond 75231 PARIS CEDEX 05, France

The Gulf of Oman basin is located between the Oman Mountains and the Makran coast. It contains the offshore extension of the Semail ophiolite in the south and the Makran accretionary prism in the North. With the help of a grid of 2D-multichannel seismic lines linked to well data, we present a new view of the obduction and post-obduction history of the Oman margin that led to new age control for the Makran accretionary wedge. The deposits can be divided into two main mega-sequences. The older one is comprised of late Cretaceous to Paleogene deposits mainly located in sub-basins west and along the offshore extension of the Semail gap. This interval is heavily influenced by obduction and post-obduction processes that dictate the sedimentary processes that are dominated by mass wasting and deformation of these deposits. The youngest, Neogene sequence, is dominated by deep water processes linked to contourites and turbidite sedimentation, and the growth of the Makran accretionary prism. The prism's main decollement consists of over-pressured Oligocene mud, the mobility of which varies along strike, impacting the structure of the imbricate fan. Beyond the imbricate fan, the innermost part of the offshore prism presents wedge top basins that vary greatly in structure and geometry along strike. This asymmetry could be explained by competing factors of sedimentation and deformation, and the presence of mid-level decollements of different ages in the western and eastern parts of the prism.

**Mots-Clés:** Gulf of Oman, Semail Ophiolite, Makran accretionary prism, Seismic interpretation, Obduction, Subduction

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: dia.ninkabou@upmc.fr

## Stratigraphic architecture and evolution of the Cretaceous evaporites of the West African margin, insight from the proximal domain of the South Gabon, Congo and Cabinda area

Alexandre Pichat <sup>\*ψ1,2</sup>, Vincent Delhaye-Prat<sup>φ2</sup>, Laurent Gindre-Chanu <sup>3</sup>, Philippe Wolff <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs (E2S-UPPA, Total, CNRS, LFCR-IPRA) – Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA], TOTAL – 64013 Pau, France

<sup>2</sup> TOTAL, Centre Scientifique et Technique Jean-Féger – TOTAL, CSTJF, Pau – France

<sup>3</sup> CVA Geosciences Consultant – CVA – France

The Cretaceous evaporites of the South Atlantic act as a major Ancient salt giant. The salt precipitated at the Late Aptian, during a short interval (< 1 Ma) commonly linked to the lithospheric break-up period of the margin. Despite the importance of such a stratigraphic event in the understanding of the margin evolution, the geologic framework leading to such accumulations of salt in the South Atlantic is still debated. From the South Gabon to the Cabinda, the proximal domain of the West African Margin has limited diapiric deformations and the depositional stratigraphic architecture of the 1 km-thick evaporites is still preserved. The mining and oil industries performed many wells and seismic prospection in this area, offering a unique dataset that we investigated for the comprehension of the salt basin.

Well logs interpretations highlight twelve equivalent-order evaporitic sequences that can be correlated over the entire studied area. Each of them starts with organic-rich dolomitic shale grading upward to crystalline halite. Carnallite beds interbedded with halite constitute the end-members of depositional sequences, except for four of the evaporitic sequences that end with bischofite-tachyhydrite precipitations. The first evaporitic sequence displays localized shallow-water saline deposits emplaced in topographic lows. The second and third sequences have an homogeneous but relatively thin distribution over the margin, suggesting a large scale flooding of the basin. The following sequences 4 to 8 remain widespread but evidence a depocenter migrating from the Cabinda (sequences 4 and 5), to the central Congo (sequence 6), to the South Gabon (sequences 7 and 8). This trend is supported by the similar migration of isolated bischofite-tachyhydrite depocenters in the sequences 6, 7 and 8. We interpret the migrating pattern as resulting from halokinetic deformations together with the tectonic activity of major fault transforms affecting the proximal domain of the margin. Finally the sequences 9 to 12 remain more homogeneously widespread and relatively thick over the studied area, highlighting the re-establishment of a large-scale subsidence of the margin.

The results evidence the significant interplay between the evaporites sedimentology, the halokinesis and the structural inheritance of pre-salt deposits in the West African margin. Ongoing sedimentologic and geochemical investigations on core samples should provide further insights on the depositional setting of the different evaporite sequences.

**Mots-Clés:** Salt giant, evaporite, Cretaceous, West African Margin, stratigraphy

Intervenant

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: alexandre.pichat@gmail.com

## Lithostratigraphie des faciès sparnaciens du Bassin parisien. Révision de la nomenclature grâce aux nouvelles données sédimentaires, minéralogiques, chémo et bio-stratigraphiques

Florence Quesnel <sup>\*ψ1</sup>, Alina Iakovleva <sup>2</sup>, Christine Fléhoc <sup>1</sup>, Jean-Marc Baele <sup>3</sup>, Thierry Smith<sup>4</sup>,  
Emile Roche<sup>5</sup>, Chantal Bourdillon <sup>6</sup>, Sylvain Garel<sup>7</sup>, Jérémy Jacob<sup>1</sup>, Johann Schnyder<sup>1</sup>,  
Noémie Breillat <sup>1</sup>, Jean-Yves Storme<sup>1</sup>, Johan Yans<sup>8</sup>, Catherine Lerouge <sup>1</sup>, Christian Dupuis<sup>4</sup>

<sup>1</sup> BRGM, Institut des Sciences de la Terre d'Orléans - UMR7327 (ISTO) – BRGM / <sup>2</sup> Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky pereulok 7, 119017 Moscow- Russie / <sup>3</sup> Université de Mons (UMons) - Belgique / <sup>4</sup> Royal Belgian Institute of Natural Sciences – Rue Vautier 29, B-1000 Brussels, Belgique / <sup>5</sup> Laboratoire PAL3 – Université de Liège, Bâtiment B18, Allée du six Août, 14 B-4000 LIEGE (Sart Tilman), Belgique / <sup>6</sup> Stratigraphie et biochronologie – France / <sup>7</sup> Sorbonne Université, CNRS-INSU, ISTeP UMR 7193, UPMC - Paris VI, CNRS : UMR7193- France / <sup>8</sup> Université de Namur - Département de Géologie (UNamur) - Belgique

Dans le Bassin parisien, les dépôts marins des Groupes de la Vesles (Thanétien) et de la Montagne de Laon (Yprésien) sont séparés par les terrains continentaux à côtiers du Groupe du Mont Bernon. Ces facies sparnaciens sont étudiés par notre équipe multidisciplinaire depuis 2007, car ils enregistrent les effets d'une crise climatique liée à une émission massive de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Cette crise hyperthermique, appelée PETM (*Paleocene-Eocene thermal maximum*), qui a eu lieu il y a 55,8 Ma (limite P/E), fut assez brève (170 ka) et intense (+ 5 à 8 C). Evénement global étudié comme analogue à la crise climatique actuelle, il est marqué par une excursion isotopique négative de 2 à 6 ‰ du  $\delta^{13}\text{C}$ , mesurée tant dans les carbonates que la matière organique. Il coïncide avec diverses perturbations environnementales, liées à l'augmentation des événements climatiques extrêmes ou l'acidification des océans. Peu étudié aux latitudes moyennes, aucune étude régionale intégrée des effets du PETM en milieu continental à côté n'est publiée. L'étude porte sur une trentaine de successions de référence auxquelles les informations géologiques bien décrites sont incorporées. Le but est de réviser la nomenclature lithostratigraphique en intégrant les nouvelles données isotopiques et biostratigraphiques, d'établir des corrélations bien calées dans ces terrains aux fréquents hiatus et passages latéraux de faciès, et de disposer d'une trame robuste pour reconstituer l'évolution des paysages, faune et flore. Nos résultats montrent un enregistrement exceptionnel du PETM sur 15 à 25 m, suggérant un taux de sédimentation exacerbé. Les étapes identifiées permettent des corrélations fines, i) notamment au début de l'événement en milieu fluviatile, plus rarement lagunaire à lacustre, ii) puis dans les plaines alluviales, avec développement de calcrètes et paléosols bariolés, iii) puis, le niveau de base montant, dans les marécages, lacs et lagunes, avant les dépôts marins de l'Yprésien s.s. Faune et flore se renouvellent, une eutrophisation des milieux aquatiques et l'acmé de genres de dinoflagellés dans les lagunes sont observées. Données biostratigraphiques à l'appui, chaque phase isotopique identifiée permet de caler les passages latéraux de faciès et de construire les cartes paléogéographiques. Il apparaît que certaines unités lithologiques considérées avant nos travaux comme uniques dans le Bassin se singularisent avant, pendant et après le PETM, notamment des unités de lignite, argile plastique, sable fluviatile, calcaire lacustre et falun lagunaire.

**Mots-Clés:** Lithostratigraphie, Bassin parisien, faciès sparnaciens, PETM, Thanétien, Yprésien,  $\delta^{13}\text{C}$ , biostratigraphie

## Large scale Mass Transport Complexes: a key element related to the falling stage of the Messinian Salinity Crisis

Jean-Loup Rubino <sup>\*1</sup>, Caroline Colle <sup>2</sup>, Christian Gorini <sup>3</sup>, Damien Do Couto <sup>4</sup>, Knut-Gunnar Steinsbo <sup>2</sup>

<sup>1</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) – TOTAL –Avenue Larribau 64018 Pau Cedex, France

<sup>2</sup> TOTAL S.A. – France

<sup>3</sup> UPMC /ISTEP – Sorbonne Universités, UPMC, CNRS – France

<sup>4</sup> UPMC – Sorbonne Universités, UPMC, CNRS – France

By reviewing seismic profiles in Mediterranean, Black & Caspian Seas, it appears that large scale simple or stacked MTC's are a very common feature associated to the Messinian Salinity Crisis (MSC). They are reported in Sirt Basin, offshore Libya, Bowman (2012), in Black Sea, Tari et al. (2015) & North & South of Alboran Sea, Do-Couto (2016), Estrada et al. (2018) where they are sealed by latest messinian deposits. Sometimes they are equivalent of the CU unit as labelled by Lofi et al. (2010) which is often chaotic, Loncke et al. (2010). Quite recently one of them, developed in Ionian Sea at the base of the Malta Escarpment has been interpreted as the result of the Zanclean megaflood, Micallef et al. (2017). Here we emphasize on others cases which suggest that they can be related to the falling stage of the crisis. This is the case in Caspian Sea and offshore Cyprus where downstepping forced regressive wedges pass through the MTC. These forced regressive wedges are either made of carbonates or clastics depending of their settings. Because of the amplitude of the drawdown (1500m+), the sedimentary prisms sharply rest over unstable pre-messinian slope shales, it is why the forced regressive wedges are poorly preserved because they are incorporated within the MTC. Locally the MTCs seem to include pre-messinian slope shales, this depends upon the location of the detachment level. In turn the MTC is sealed by latest Messinian backstepping deposits or even Pliocene. These deposits infill incised valley running on top of the MTC; to date, the best documented example being the Abu Madi Fm in the Nile system. Finally the MTCs pass through evaporites (Lower Unit?) in the distal part of the basin where they seem to onlap or possibly interfinger with, it means that evaporites could be engaged in the MTC. The key question is to distinguish if these MTCs are subaerial land wastes or if they are classical subaqueous slumps as suggested by Tari et al. 2015. The occurrence of valley incisions on top of the MTC like in the Nile and in Alboran Sea and also in Caspian Sea where deltaic facies rest either above the Messinian Unconformity or on top of the MTC, tend to suggest that at least the upper part could be subaerial.

**Mots-Clés:** MTC, Messinian Salinity Crisis, Falling stage

\*Intervenant

## Analyse multi-échelle de sediment waves de la marge du Golfe du Lion – Processus de formation et facteurs de contrôles

Séverine Russo <sup>\*1</sup>, François Lafont <sup>ψ1</sup>, Serge Berné <sup>φ2</sup>, Jean-Loup Rubino <sup>§1</sup>

<sup>1</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) – Université de Perpignan Via Domitia – France

<sup>2</sup> Centre de Formation et de Recherche sur les Environnements Méditerranéens - CEFREM (Perpignan, France)

Des *sediment waves* sont observées sur la marge du Golfe du Lion, en Méditerranée occidentale, dans des environnements différents. L'analyse multi-échelle est possible en combinant plusieurs types de données sismiques. Les données de sismicité conventionnelle (pétrolière, campagne LRM) montrent qu'à la suite de la crise messinienne, le plateau continental se reconstruit avec l'enchainement de prismes progradants. C'est sur la pente pliocène que se développent des *sediment waves* de hauteur moyenne de 80 m et de longueur d'onde kilométrique. Au total, le domaine affecté par les *sediment waves* forme une bande de 3 500 km<sup>2</sup>, sensiblement parallèle au rivage actuel. L'orientation des crêtes est parallèle aux isobathes, c'est-à-dire dans la direction Nord/Sud au sud de la zone, puis tournant progressivement vers le NNE. Elles sont très bien développées dans la partie Sud alors qu'au Nord, elles s'atténuent et finissent par disparaître. La caractérisation lithologique des *sediment waves* pliocènes est difficile car on dispose uniquement de données de diagrégation par gamma ray. Ces mesures suggèrent une alternance de silts argileux et de lits sableux qui semblent traduire une certaine rythmicité. Les corrélations stratigraphiques basées sur les "cuttings" pétroliers montrent que les *sediment waves* se sont formées, à la même profondeur, pendant pratiquement tout le Pliocène au fur et à mesure de la progradation de la marge. Par contre, elles disparaissent au Quaternaire, du moins à cet endroit de la marge (on en retrouve sur la Ride Sédimentaire Pyrénéo-Languedocienne, au pied de la marge catalane, ainsi qu'en haut de marge, au sud du canyon du Cap de Creus). Il est possible que leur disparition soit liée au développement concomitant des canyons sous-marins, qui auraient focalisé les transferts hydrosédimentaires ou par le changement climatique important qui définit la limite plio-quaternaire. La morphologie de la marge est particulière liée à la régression marine du messinien. La pente continentale est donc disséquée et forme un replat qui semble contrôler la mise en place et le développement des *sediment waves*. L'arrêt de ces dernières semble coïncider avec la fin de la reconstruction du plateau, moment où le profil de la marge redevient normal. Si l'on admet que ces figures sédimentaires se comportent comme des antidunes, cela implique que des courants de "downwelling" ou des cascades d'eau dense sont à leur origine.

**Mots-Clés:** sediment waves, Golfe du Lion, cascading

<sup>§</sup>Intervenant

\*Auteur correspondant: severine.russo@etudiant.univ-perp.fr

## Impact of rapid and repetitive changes in relative sea level on sedimentary record and stratigraphic architecture on the northern margin of Gondwana during the Upper Jurassic-Lower Cretaceous (example of Southern Tunisia)

Marwa Taamallah \* , Mohamed Ouaja , Mohamed Soussi , Jean-Yves Reynaud ¶

Faculté des Sciences Mathématiques, Physiques et Naturelles de Tunis (FST) - Tunisie

The stratigraphic organization of Upper Jurassic and Lower Cretaceous series, outcropping along the Dahar cliff in south-eastern Tunisia, shows the stacking of depositional sequences comprising transgressive systems tracts only. Regressive systems tracts are, however, systematically absent due to a very low accommodation of the Gondwana margin. The sequence boundaries correspond to subaerial unconformities delineating incised valleys formed during rapid falls of relative sea level. The valley fills terrigenous, tide-dominated deposits, bounded at the top by thin carbonate platforms that extend across the valley interfluves during maximum floodings. In the Douiret Formation, sands and clays which constitute the incised valley fills are characterized by their abundance in vertebrates and plant fossils. These deposits exhibit large-scale Inclined Heterolithic Stratification (IHS) interpreted as tide-influenced point-bars, particularly well developed at the base of the Douiret Formation. The high reservoir potential of IHS make them stratigraphic objects of prime interest.

The Douiret Formation records an overall upward decrease in amount of incision and channelling together with an increase in lateral extent and shaliness of the TSTs. This stratigraphic evolution is questioned by ongoing microfacies studies, a requirement to a better characterization of the depositional setting of the Douiret Formation.

**Mots-Clés:** Incised valleys, tidal facies, Upper Jurassic, Lower Cretaceous, point bars, IHS, Gondwana margin, Southern Tunisia.

\*Intervenant

## Development patterns of an oligo-mesophotic isolated carbonate buildup (Upper Burman Limestone, Lower Miocene, Yadana field, offshore Myanmar)

Thomas Teillet <sup>\*†1,2</sup>, François Fournier <sup>2</sup>, Lucien Montaggioni <sup>2</sup>, Marcelle Boudagher-Fadel <sup>3</sup>,  
Jean Borgomano <sup>2</sup>, Juan Braga <sup>4</sup>, Quentin Villeneuve <sup>1,2</sup>, Fei Hong <sup>1</sup>

1 TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – Centre Scientifique et Technique Jean Féger.  
Avenue Larribau 64018 Pau Cedex, France

2 CEREGE – IRD : UMRD161, AixM arseilleU niversit : U M 34, CollgedeF rance :  
U M R7330, CNRS

3 Department of Earth Sciences, University College London, London WC1H 0BT, UK – Royaume-Uni

4 Université de Grenade, Departamento de Estratigrafía y Paleontología (UGR) – Campus de Fuentenueva s.n. 18002  
Granada, Espagne

The development history of a strictly oligo-mesophotic, Lower Miocene, isolated carbonate platform in the northern Andaman Sea (Yadana platform) has been evidenced from the integration of sedimentological core studies, well-correlations, seismic geomorphology and analysis of the ecological requirements of the main skeletal components. Three types of carbonate factory operated on the top of the platform, depending on the paleoceanographic setting: 1) a scleractinian-echinodermal carbonate factory developing under meso-oligophotic, and high- nutrient (mesotrophic to eutrophic) conditions, 2) a large benthic foraminiferal (LBF)-coralline algal carbonate factory prevailing under mesophotic and oligotrophic conditions and 3) a LBF carbonate factory dominating in oligophotic and oligotrophic settings. The low lateral changes in facies, the layer-cake depositional architecture inferred from well-correlations and the seismic expression of the Yadana buildup suggest a deposition on a flat shelf. Carbonate production and accumulation on the Yadana platform has been shown to be mainly controlled by light intensity, nutrient content and water energy. Corals have been shown to preferentially develop in low-light and high-nutrient setting and are accompanied by abundant communities of suspension- feeders such as ophiuroids. Changes in monsoonal intensity and terrestrial runoff from the river Irrawaddy during the Early Miocene, are likely responsible for the repeated development of high- nutrient, low-to-moderate water transparency conditions as well as for the episodic occurrence of upwelling currents and/or internal waves, that promoted the development of an oligo-mesophotic, incipiently drowned platform.

**Mots-Clés:** Sedimentology, Carbonate, Miocene, Asia

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>†</sup>Auteur correspondant: teillet@cerege.fr

## Current deep-water sedimentation in the Comoros archipelago: Submarine volcanic morphology revealed by morpho-bathymetric analysis.

Athina Tzevahirtzian <sup>\*1</sup>, Sébastien Zaragosi <sup>\* $\psi$ 1</sup>, Elodie Marches <sup>\*2</sup>, Laurie Biscara <sup>2</sup>,  
Patrick Bachelery <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Bordeaux, UMR CNRS 5805 EPOC (EPOC) - France

<sup>2</sup> Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) - Ministère de la Défense - France

<sup>3</sup> Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) - Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, Institut de recherche pour le développement [IRD], CNRS : UMR6524, Université Jean Monnet - Saint-Etienne

The Comoros archipelago, located in the north of the Mozambique Channel, is a volcanic complex whose underwater section is so far little studied. The scientific community is currently debating the genesis of this archipelago. The initial hypothesis assumed the presence of a hot spot contributing to the formation of the volcanic islands. However, several authors propose alternatives to this hypothesis by proposing among other things the role of deep accidents. Until now, the lack of data and work on the submerged part of the Comorian Islands has prevented scientists from answering the questions raised 50 years ago about the genesis of this archipelago. The objective of this work is to present an initial morpho-bathymetric analysis of the underwater section of the archipelago. Since 2004, several oceanographic surveys and numerous transit valuations carried out by SHOM and BRGM have enabled the acquisition of data necessary for this study (bathymetric data, seismic data and acoustic imagery). A mapping of the whole study area was therefore possible for the first time, allowing a fine bathymetric analysis on the entire archipelago. This study highlights the morphology of the slopes and the identification of numerous structures of volcanic and sedimentary origin. The geomorphological study made it possible to establish a chronology in the succession of the formation of the islands of the archipelago. Finally, a myriad of volcanic cones is present throughout the archipelago with a denser concentration near active volcanic structures. Linkages are being established between the location of the volcanic edifices and a possible network of deep fractures that seem to structure the archipelago.

**Mots-Clés:** Comoros archipelago, multibeam bathymetry, submarine volcanic cones.

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>$\psi$</sup> Auteur correspondant: [sebastien.zaragosi@u-bordeaux.fr](mailto:sebastien.zaragosi@u-bordeaux.fr)

## Lithofacies and depositional setting of mudstones from the Namurian Chokier Formation in the Wallonian and Campine basins, Belgium

Wei Wei <sup>\*ψ1</sup>, Rudy Swennen <sup>2</sup>

<sup>1</sup> KU Leuven – Belgique

<sup>2</sup> KU Leuven – Division of Geology, Celestijnenlaan 200E, B-3001 Leuven-Heverlee, Belgique

The Chokier Formation is one of the main lithostratigraphic units of the Middle Carboniferous Namurian stage, which is distributed in the Wallonian (Namur-Vesdre synclinoria) and Campine basins. It is considered to be a potential target for unconventional hydrocarbon exploration with two shallow boreholes in southern Belgium having revealed its shale gas potential. This study specifically focuses on the depositional environment of the Chokier Formation. Sediment deposition occurred in a Variscan foreland basin and is associated with a general regression of the Rheic Ocean during the Carboniferous. The petrology, mineralogy, sedimentary structures and lithofacies are studied in four drill cores from Seilles, Engis, Turnhout, Poederlee and two outcrops from the Hautrage and Marchempre quarry. Based on field work and core description, the petrology and mineralogy are refined based on microscopic observations, supplemented by X-ray diffraction and cathodoluminescence (CL). Lithofacies are classified conform the Schlumberger mudstone classification using the composition and sedimentary structures. Petrological study of the cores reveals that the Chokier Formation consists predominantly of mudstone with thin sandstone and limestone intercalations. Mudstone laminations reflect periodic hydrodynamic variations, while lenticular fabrics indicate intermittent erosion and bed load transport of surficial water-rich muds. Other lithological intervals show homogeneous mudstones caused by gradual deposition from suspension. Locally, soft-sediment deformation structures indicate gravity flow deposition. Six mudstone lithotypes have been recognised through petrographical and mineralogical analysis, i.e. silica-dominated, clay-rich siliceous, silica-rich argillaceous, carbonate-rich siliceous, silica-rich carbonate, carbonate-dominated mudstones. Combining the above results, fourteen lithofacies are differentiated. We consider the Chokier Formation to have been deposited in a shallow marine and distal prodelta environment dominated by suspension and erosive bed load transport. The upper part of the Chokier Formation was locally affected by turbidity currents carrying sand-rich sediments mixing with mud-dominated sediments by rapid loading.

**Mots-Clés:** Mudstone, Lithofacies, Deposition setting, Namurian, Chokier Formation, Belgium

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: wei.wie@kuleuven.be

## **1.2. Source-to-Sink : nouvelles approches pour la compréhension des couplages surface-profondeur, cas d'études et méthodologies**

## Les séries syn-orogéniques du piémont nord-pyrénéen : origine et mode de transfert

Mustafa Al Reda <sup>\*1</sup>, Jocelyn Barbarand <sup>1</sup>, Eric Lasseur <sup>2</sup>, Cécile Gautheron <sup>1</sup>, Justine Briais <sup>2</sup>,  
Nicolas Loget <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Paris-Sud (GEOPS) - CNRS : UMR8148, INSU, Université Paris XI - Dépt. ST ORSAY, France

<sup>2</sup> BRGM- 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans, Cedex 2, France, France

<sup>3</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris – CNRS : UMR7193, Université Pierre et Marie Curie (UPMC) - France

La dynamique de formation d'une chaîne de montagne peut être reconstruite à partir de l'étude des bassins qui ont reçu les produits d'érosion. Les travaux présentés ont été réalisés dans la partie orientale du bassin Nord-Aquitain (Corbières), à partir de l'étude des Poudingues de Palassou. Ces sédiments, en majorité conglomératiques, traduisent une phase d'érosion majeure des reliefs, accompagnant la continentalisation des bassins au cours de l'Yprésien et la période de raccourcissement principal de l'orogenèse pyrénéenne. L'objectif de cette étude est de comprendre le mode de remplissage du bassin d'avant-pays nord pyrénéen et son évolution verticale et latérale au cours de l'Eocène, ce qui permettra d'appréhender la formation des reliefs à l'intérieur de la chaîne. La formation de Palassou est définie en trois unités avec des clastes de natures variables. Les unités 1 et 3 semblent contenir du matériel mésocénozoïque, l'unité 2 étudiée spécifiquement ici présente une forte dominance de roches paléozoïques. Les résultats présentés ici se concentrent sur des clastes de granite du bassin qui ont été étudiés par datation U/Pb sur zircons issus de la matrice, et des datations de thermochronologie basse température (traces de fission et (U-Th-Sm)/He sur apatite (AFT et AHe) étudiés à l'intérieur des mêmes clastes.

Les âges U/Pb sur zircon obtenus sur les galets de granite sont centrés autour de  $320 \pm 5$  Ma sauf pour un échantillon localisé au nord des Corbières qui présente des âges plus vieux (entre 460 Ma et 2.5 Ga). Les âges de  $320 \pm 5$  Ma sont comparables aux âges de plusieurs massifs situés dans l'est des Pyrénées tandis qu'une source dans la Montagne Noire est proposée pour l'échantillon le plus au nord. Ces données, couplées aux directions de courant relevées dans ces séries, semblent indiquer une alimentation provenant du sud-est via l'érosion des granites varisques de la zone est-pyrénéenne. Ces séries détritiques caractérisent donc une extension du prisme orogénique des Pyrénées et un phénomène majeur d'érosion pour la partie orientale de la chaîne.

Les âges AFT s'étalement entre  $44 \pm 4$  et  $27 \pm 2$  Ma avec un rajeunissement des âges d'est en ouest tandis que les âges individuels AHe obtenus montrent une gamme plus large avec une majorité d'âges compris entre 23 et 70 Ma. Une partie de ces données AHe fournis ont un âge thermochronologique plus vieux que l'âge stratigraphique (40-33 Ma) et permet ainsi de mettre en évidence un épisode d'érosion des zones sources ayant eu lieu à la fin du Crétacé ou au début du Cénozoïque. Des âges plus jeunes ou égaux à l'âge stratigraphique mettent en évidence un événement thermique régional. La modélisation thermique montre en effet un réchauffement post-Bartonien, traduisant une série sédimentaire plus épaisse à l'époque partiellement érodée actuellement. Ceci implique alors un enfouissement créé par l'augmentation dans la quantité de sédiments dans le bassin, suivie d'une phase d'érosion probablement fin Oligocène-Miocène contemporaine avec l'ouverture du Golfe du Lion.

**Mots-Clés:** Datation, thermochronologie basse température, série de Palassou, Corbières, histoire thermique

\*Intervenant

## Late Cretaceous to early Paleogene deformations in the western part of the Eurasian plate

Guillaume Baby <sup>\*ψ1</sup>, François Guillocheau <sup>1</sup>, Justine Briais <sup>2</sup>, Eric Lasseur <sup>2</sup>, Paul Bessin <sup>3</sup>, Cécile Robin <sup>1</sup>, Stéphane Brusset <sup>4</sup>, Patrice Baby <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Géosciences – Université de Rennes I – Rennes, France

<sup>2</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières – BRGM – France

<sup>3</sup> LPG - Le Mans – Le Mans Université – France

<sup>4</sup> Géosciences Environnement Toulouse – Université Paul Sabatier - Toulouse 3 – France

The Late Cretaceous to early Palaeogene is a period of major deformations of the western part of the Eurasian plate within both the context of the Africa-Eurasia convergence and the North Atlantic opening. Two mechanisms are proposed: (1) surface upwelling caused by flows in the underlying mantle (Iceland Plume upwelling) and/or (2) horizontal lithospheric deformations (Africa, Iberia, Eurasia convergence). Here we discuss the timing, spatial distribution, types and magnitude of these deformations. Two approaches are used:

- (1) Geomorphology - on the mapping and chronology of all the macroforms (planation surfaces, incised rivers) dated by intersection with the preserved sediments, weathering and volcanics;
- (2) Basin stratigraphy and structural analysis - on a more classical dataset of seismic lines, wells and field observations, coupled with biostratigraphic re-evaluations.

We provide an European-scale cross section that has been restored from the early Turonian to the Oligocene, through the North Pyrenean Zone, Eastern Aquitaine Basin, French Massif Central and Paris-Brussels Basins. We combine two methods to quantify the magnitude of the deformations: (1) depositional domain - 2D accommodation space measurements; (2) erosional domain - difference between the present-day elevation of ancient sea-level markers (marine sediments scattered upon it) and a global sea-level curve.

The first outcomes of our study are:

- The Late Cretaceous is a period of enhanced subsidence. All the studied area is covered by marine chalk deposits.
- A major period of deformation occurs at the Cretaceous-Tertiary boundary possibly sub-divided into two sub-periods: intra-Maastrichtian-pre-middle-Danian and Upper Danian - pre-Thanetian.
- Long wavelength ( $\times 100$  km) and moderate amplitude uplift ( $\times 100$  m) coupled with intense erosion affects the northern border of the French Massif Central and the Paris and Brussels Basins. A major change in the sedimentary system occurs from open marine chalcs to siliciclastic shore deposits. To the south, extremely low accommodation rates are recorded in the retro-wedge of the eastern Aquitaine Basin with no evidences of uplift. The Eocene to Chattian corresponds to a period of enhanced subsidence in the eastern Aquitaine Basin whereas the Paris Basin has become a very low subsiding domain. Most of the accommodation took place in the Brussels Basin.

*"This work is founded and carried out in the framework of the BRGM-TOTAL project Source- to-Sink."*

**Mots-Clés:** déformations laramides, stratigraphie de bassin, géomorphologie, bassin de Paris, bassin Aquitain, Massif central

<sup>\*</sup>Intervenant

## Paléosurfaces d'altération du Massif central

Julien Baptiste <sup>\*ψ1</sup>, Robert Wynd

<sup>1</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) – Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – 3, avenue Cl. Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2, France

Au sein du Massif central, une majeure partie du relief est caractérisée par des géomorphologies en forme de plaines et plateaux. L'altitude des plateaux est hétérogène, elle peut varier de la centaine de mètres à plus de 1000m. Ces surfaces correspondent à des surfaces d'aplanissement portant des profils d'altération. Ces surfaces d'altération font échos aux mouvements verticaux affectant la lithosphère qui peuvent être raccrochés à différentes phases tectoniques (phase orogénique, épaulement de rift...) possédant des longueurs d'ondes différentes. Certaines de ces paléosurfaces ont été scellées par des sédiments puis exhumées lors des grandes phases d'érosion, la dernière ayant débuté après le Miocène moyen, en réponse au soulèvement du Massif central tel que nous le connaissons. Néanmoins, l'âge ainsi que les déformations des paléosurfaces du Massif central font encore débats.

A l'aide d'une analyse multi-méthode à la fois numérique (analyse du MNT à 25m, des pentes, des courbures...), géologique (géomorphologie, indices lithologiques, attitude des profils d'altération...) et géométrique, une carte actualisée des paléosurfaces d'une large partie du Massif central, à savoir du sud du Limousin à la Montagne Noire en passant par la Margeride et l'ouest des Cévennes est proposée.

Sur cette carte, quatre surfaces d'aplanissement peuvent être décrites : (i) une surface S0, supposée infra-triasique voire plus ancienne, dont les profils d'altération sont scellés par des sédiments triasiques, (ii) une surface S1 supposée infra-liasique, et dont le profil d'altération est scellé par les sédiments liasiques, (iii) une surface S2 probablement Crétacé inférieur, scellée par le Cénomanien transgressif dans le Poitou et dans les Causses du Quercy, et le Coniacien dans les Grands Causses. Cette surface S2 est marquée par la présence de bauxite, largement karstifiée, au sommet des formations sédimentaires jurassiques des Grands Causses et par des silicifications (meulières) des sédiments jurassiques, (iv) une surface S3 rattachée à une surface d'aplanissement éocène présente principalement sur le pourtour du Massif central, reprenant parfois la surface S2 comme le montre la présence de silcrêtes au sommet des profils d'altération et enfin (v) une surface S4, plus récente scellée par des coulées volcaniques du Miocène et à partir de laquelle se sont incisées les vallées actuelles.

*Travaux de recherche financés et réalisés dans le cadre du programme BRGM-TOTAL Source-to- Sink.*

**Mots-Clés:** Paléosurfaces, Massif central, Altération

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: j.baptiste@brgm.fr

## Late Oligocene-Pliocene weathering periods in Europe evidenced by new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating on cryptomelane from the Stavelot Massif (NE Ardenne, Belgium).

Augustin Dekoninck <sup>\*1</sup>, Patrick Monié <sup>2</sup>, Hatert Frédéric <sup>3</sup>, Sabine Blockmans <sup>1</sup>, Gaëtan Rochez <sup>1</sup>,  
Johan Yans <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Namur, Département de Géologie, ILEE (UNamur - ILEE) – Belgique

<sup>2</sup> Laboratoire Dynamique de la Lithosphère (LDL) – CNRS : UMR5573, Université Montpellier II France

<sup>3</sup> Laboratoire de minéralogie et de cristallochimie, Département de Géologie, Université de Liège, Belgique

The Stavelot Massif (NE Ardenne, Belgium) displays numerous occurrences of Mn-rich slates Ordovician in age (Les Plottes Member, Ottre Formation, Salm Group). The Mn-bearing sediments experienced metamorphism during the Caledonian and Variscan orogenesis, leading the former Mn-carbonates to be transformed into spessartine, rhodochrosite, Mn-chloritoïd and andalusite-kanonaite, some of them being associated with pyrophyllite, paragonite, kaolinite and chlorite (e.g. Herbosch et al. 2016). These levels have subsequently undergone strong weathering, leading to the formation of secondary Mn-oxides. This supergene association is mainly composed of typical weathering phases cryptomelane ( $\text{KMn}_8\text{O}_{16}$ ), lithiophorite  $[(\text{Li},\text{Al})\text{MnO}_2(\text{OH})_2]$  and manganite ( $\text{MnOOH}$ ). New  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of pure cryptomelane samples record at least four major weathering periods at 27 Ma, 20(-15?) Ma and 12-10 Ma in the Stavelot Massif. Ages between 5-1 Ma report the more recent weathering phase. However, some ancient weathering periods (Cretaceous, Permian ?) cannot be ruled out, as they are very common in other weathered deposits of western Europe (Yans 2003, Thiry et al. 2006), and suspected in some discordant  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  spectra. The late Oligocene age might be attributed to the first effect of the Ardenne uplift, which has started at the end of the Oligocene, and continued until recent times (Demoulin et al. 2018). Therefore the combined effect of the Ardenne elevation and Cenozoic climates could explain these weathering periods. Such late Oligocene to Pliocene ages are also reported in several places in Europe (Hautmann and Lippolt 2000) and North Africa (Dekoninck et al. 2014), suggesting a long-term weathering period, which is probably linked to the global effect(s) of the Alpine orogenesis across the European plate.

Dekoninck et al. (2014). *Gisements supergènes d'oxy-hydroxydes de manganèse du district d'Imini (Maroc): minéralogie, géochimie et chronologie*. ASF, Orsay. References

Demoulin et al. (2018). *Erosion surfaces in the Ardenne-Oesling and their associated kaolinic weathering mantle*, Springer, Cham, pp. 63–84.

Hautmann and Lippolt (2000).  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of central European K-Mn oxides - a chronological framework of supergene alteration processes during the Neogene. *Chem. Geol.* 170, 37–80.

Herbosch et al. (2016). Coticules of the Belgian type area (Stavelot-Venn Massif): Limy turbidites within the nascent Rheic oceanic basin. *Earth Sci. Rev.* 159, 186–214.

Thiry et al. (2006). Continental France and Belgium during the early Cretaceous: paleo-weatherings and paleolandforms. *B. Soc. Géol. Fr.* 177, 155–175.

Yans (2003). An overview of the saprolites of Belgium and their potential kaolinitic supplies to Mesozoic and Cenozoic sediments. *Géol. Fr.* 1, 33–37.

**Mots-Clés:** Stavelot Massif, manganese deposit, coticule, cryptomelane, weathering,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

<sup>\*</sup>Intervenant

## “Magnetic fingerprinting” of fluvial suspended particles in the Canche River watershed (Nord-Pas-de-Calais, France) – approaching the hydro-sedimentary budget regarding fertile soil erosion

Christine Franke <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Edouard Patault <sup>1,2</sup>, Claire Alary <sup>2</sup>, Nor-Edine Abriak <sup>2</sup>, France Lagroix <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Mines ParisTech, Centre des Géosciences - Paris Sciences Lettres Research University - France

<sup>2</sup> Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai (IMT Lille Douai) - LGCgE - France

<sup>3</sup> Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) -, Université Paris Diderot - Paris 7, UMR7154 - France

In northern France, where land use is mainly dominated by agricultural activity, erosion by water run-off results in heavy loss of fertile soil and leads to the gradual disappearance and depletion of this non-renewable resource at human time scales. Additionally, water erosion can significantly damage the aquatic habitat and can be responsible for the input of nutrients, bacteria, pesticides or heavy metals into surface water. This study combines environmental magnetic characterisation (room- and low-temperature properties) with other sediment-physical (grain size analyses, XRD, color spectroscopy) and geochemical analyses (ICP) on suspended particulate matter. The objective is to develop effective tools to trace erosion induced by water run-off. In 2015/2016, "seasonal" spatiotemporal sampling campaigns of suspended particulate matter (SPM) were conducted at key positions along the Canche River and its tributaries using bottle sediment traps. The concentration of magnetic mineral particles in the recovered dry bulk SPM is quantified from saturation magnetizations (MS) obtained from room-temperature hysteresis loop analyses. MS and remanent saturation magnetization values (MRS) of the SPM are typical of agricultural soils in the region. However, magnetic concentration and total iron from geochemical analyses are not always correlated. During low water conditions ("natural fluvial background signal") the Canche River SPM has isothermal remanent magnetizations (IRM) dominated by a soft ferrimagnetic mineral assemblage while during high water stages (local rain events) the IRMs are dominated by high coercivity magnetic mineral phases. Increased soil erosion, especially via water run-off, is expected during rain events. The observed temporal (seasonal) variations in magnetic mineral assemblages would be expected if the agricultural soils were enriched in goethite and/or hematite (high coercivity mineral phases) with respect to ferrimagnetic minerals. Additional low temperature remanence experiments are being conducted on selected samples providing greater insight into the mineralogy of the magnetic phases of the SPM and surrounding agricultural soils. Additionally, high-resolution local "snap shot" sampling was conducted during heavy rain events using automated sampling stations. The comparison of magnetic results and hydrodynamic parameters, such as turbidity, show the close correlation between the concentration of ferrimagnetic mineral phases (linked to the eroded soil material) and the peak of the flooding event.

**Mots-Clés:** soil erosion, fluvial particles, magnetic fingerprinting, sediment budget, Canche River watershed

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>✉</sup>Auteur correspondant: christine.franke@mines-paristech.fr

## Évolution thermique de la plaque Ouest Européenne : étude themochronologie basse température du Massif Central

Thomas Francois <sup>1</sup>, Jocelyn Barbarand <sup>\*ψ/2</sup>, Robert Wynd <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Paris Sud (UMR8148) – Université Paris Sud - CNRS – France

<sup>2</sup> Géosciences Paris Sud (GEOPS) – CNRS : UMR8148, Université Paris Sud - Paris XI – Rue du Belvedere, 91405  
Orsay Cedex, France

<sup>3</sup> BRGM – Univ. Orléans, CNRS, BRGM, ISTO, UMR 7327, F-45071, Orléans, France – France

L'exhumation des socles cristallins est encore aujourd'hui très mal contraint du fait des lacunes dans les enregistrements sédimentaires. Il existe des méthodes indirectes comme la thermochronologie basse température pour estimer cette exhumation par le biais de modélisations inverses pour interpréter les données. Les solutions issues de ces modèles ne sont pas toujours satisfaisantes lorsqu'elles entrent en conflit avec les données géologiques indépendantes.

Dans notre étude, les données géologiques sont directement utilisées comme contraintes dans nos modèles afin d'obtenir une histoire thermique précise pour reconstituer la présence d'une ancienne couverture sédimentaire complètement érodée.

Des données trace de fission sur apatite (AFT) ont été compilées et acquises sur le Massif Central français. L'inversion thermique a été réalisée en supposant que certains échantillons étaient proches de la surface au Trias, Crétacé et à l'Éocène, comme en atteste la présence de paléosurfaces datées ou assumées et des restes de couvertures sédimentaires. Les résultats montrent une évolution post-varisque complexe et inhomogène du Massif Central français. L'inversion des données AFT montre des températures plus élevées que les températures de surface pendant la majeure partie du Jurassique. La plage de température est large mais compatible avec le dépôt d'une couverture sédimentaire importante érodée plus tard au Crétacé inférieur, probablement interprétée comme une extension du bassin de Paris et du bassin d'Aquitaine et potentiellement liée à une réorganisation géodynamique liée à l'ouverture de l'océan Atlantique. La comparaison entre les différentes régions du Massif Central français montre, dans certains cas (Morvan, Montagne Noire), un refroidissement significatif au Paléocène-Eocène lié éventuellement à la construction de l'orogenèse pyrénéenne et montre que le Massif Central ne se comportait pas comme une seule unité pendant le Mézo-Cénozoïque.

Cette étude a été financée et réalisée dans le cadre du projet BRGM-TOTAL Source-to-Sink

**Mots-Clés:** thermochronologie basse température, extension des bassins sédimentaires français, géodynamique du Crétacé

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: jocelyn.barbarand@u-psud.fr

## Impact de la sédimentation sur la dynamique des systèmes continentaux dans un modèle numérique d'évolution de paysages

Laure Guerit <sup>\*ψ1</sup>, Delphine Rouby <sup>1</sup>, Xiaoping Yuan <sup>2</sup>, Jean Braun <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Geoscience Environment Toulouse CNRS (GET) – Université de Toulouse Paul Sabatier – France

<sup>2</sup> German Research Centre for Geosciences - Helmholtz-Centre Potsdam (GFZ) – Allemagne

L'érosion et la sédimentation sont des processus centraux de l'évolution de la surface terrestre car ils assurent le transfert de matière depuis les sources jusqu'aux bassins sédimentaires continentaux et marins. Ces deux processus interagissent constamment à travers le contrôle sur les niveaux de base locaux et la charge exercée sur la lithosphère, pourtant, zones en érosion et bassins sédimentaires sont le plus souvent étudiés séparément. Notre compréhension de la dynamique des systèmes sédimentaires ainsi que notre interprétation des archives sédimentaires sont donc incomplètes.

Nous présentons ici un modèle numérique d'évolution de paysages, Fastscape, dans lequel nous avons ajouté un terme de dépôt continental (projet COLORS financé par Total). Les sédiments peuvent être déposés le long des chenaux ou dans un bassin sédimentaire continental. L'intensité du dépôt est contrôlée par un coefficient G que nous avons calibré sur des exemples naturels de bassins versants associés à des cônes alluviaux.

A l'aide de ce modèle, nous explorons le comportement d'un système sédimentaire continental en réponse à des variations de soulèvement et de précipitation, et présentons les relations entre ces forçages et la morphologie des paysages. Nous montrons ainsi que sur le long terme, un changement de précipitations peut efficacement modifier la quantité de sédiments stockés dans le piedmont et modifier ainsi la quantité de sédiment qui atteint le milieu océanique.

Le couplage entre zones en érosion et zones en dépôt a un fort impact sur la morphologie des paysages et sur les flux sédimentaires, et cette étude illustre que les systèmes sédimentaires doivent être considérés dans leur ensemble, depuis les sources de sédiments jusqu'aux puits car les processus d'érosion et de sédimentation sont fortement couplés.

**Mots-Clés:** sedimentation continentale, modélisation numérique

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: laure.guerit@get.omp.eu

## Relations entre le bassin d'avant-pays et le prisme collisionnel dans les Alpes de l'Ouest : nouvelles données sédimentologiques, structurales et thermochronologiques

Jean-Baptiste Girault <sup>\*1</sup>, Nicolas Bellahsen <sup>1</sup>, Nicolas Loget <sup>1</sup>, Eric Lasseur <sup>2</sup>, Renaud Couëffé <sup>2</sup>, Claudio Rosenberg <sup>1</sup>, Matthias Bernet <sup>3</sup>, Raphaël Pik <sup>4</sup>

<sup>1</sup> ISTeP - Université Pierre et Marie Curie [UPMC] - Paris VI - France

<sup>2</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), 45060 Orléans, Cedex 2, France, France

<sup>3</sup> UJF - Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) - Université Joseph Fourier - Grenoble I - Grenoble, France

<sup>4</sup> CRPG CNRS - CNRS : UMR7358 - 15, rue Notre Dame des Pauvres 54500 Vandoeuvre les Nancy, France

Les Alpes de l'Ouest sont des lieux clés pour comprendre les relations entre le bassin d'avant-pays et le prisme collisionnel crustal car on y observe de fortes variations latérales dans les bassins de même que dans la cinématique du prisme. Néanmoins, cette zone ouest alpine n'a été que peu étudiée de ce point de vue contrairement au bassin molassique nord alpin. La transition entre ce dernier et le bassin au front des Alpes de l'Ouest est notamment encore mal comprise. Les questions majeures qui animent ce travail sont les suivantes : pourquoi le bassin molassique ouest alpin est-il réduit par rapport au bassin molassique nord alpin ? Dans l'avant pays ouest alpin, y avait-il plusieurs sous-bassins ou un bassin principal ? Peut-on faire un bilan de matière entre ce qui est accrétée, érodé, et déposé ? Quelles sont les sources de ces bassins ? La séquence structurale collisionnelle est assez bien définie et se caractérise par des phases de déformation distribuée et localisée. Cependant, l'histoire thermique des massifs cristallins externes et l'enregistrement sédimentaire du bassin d'avant-pays restent à être définis dans le détail. Nous présentons de nouvelles données thermochronologiques des massifs cristallins externes (ZFT, U- Th/He sur zircons) qui montrent comment l'exhumation se propage depuis les zones internes à externes. En parallèle, nous avons mené une étude sédimentologique et thermochronologique dans les bassins détritiques molassiques (Oligo-Miocène entre Chambéry et Genève). Après la période d'activité du bassin turbiditique au Rupélien, est enregistrée une migration significative du dépôt- centre vers l'Ouest du bassin d'avant-pays, contemporaine de la continentalisation. Pendant la période Rupélien supérieur/Chattien, la molasse d'eau douce (fluviatile puis lacustre) semble témoigner d'une augmentation de la subsidence sans migration de celle-ci. Puis, après l'Aquitainien, la molasse marine et ses facies tidaux au Burdigalien enregistre une migration de la subsidence qui accompagne la propagation de la déformation. Ces trois périodes sont caractérisées par des facies sismiques bien identifiés. Les résultats préliminaires de thermochronologie basse température sur les zircons des roches détritiques de ces bassins (rupéliers) montrent des âges ZFT qui sont s'organisent en une seule population vers 120 Ma. Les données U-Th/He et U/Pb sur les mêmes échantillons (triple data- tions) viendront probablement contraindre les sources. Ces données permettront d'affiner la séquence structurale, d'établir les relations source-to-sink dans les Alpes de l'Ouest et donc possiblement les liens entre l'évolution du prisme collisionnel alpin et la dynamique du bassin d'avant-pays.

**Mots-Clés:** Alpes de l'Ouest, Exhumation, Massifs Cristallins Externes, Bassin d'avant pays



## The subsidence driving forces in the Ganges-Meghna-Brahmaputra Delta Plain during the Holocene

Celine Grall <sup>\*1</sup>, Michael Steckler <sup>1</sup>, Mikhail Karpytchev <sup>2</sup>, Steve Goodbred <sup>3</sup>, Syed Humayun Akhter <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) – États-Unis

<sup>2</sup> Université de la Rochelle – Université de La Rochelle – UFR Sciences, LIENSs UMR 7266, France

<sup>3</sup> Vanderbilt University – États-Unis

<sup>4</sup> Dhaka University – Bangladesh

Recent studies show large variability in subsidence rates among large delta plains that directly impact coastal management of these highly vulnerable environments. Observations show both significant spatial variation in subsidence across each delta, as well as large differences in magnitude between different deltas. This variability raises the question of what are the driving forces that control subsidence in large delta plains that this study aims to address. The subsidence of the Ganges-Meghna-Brahmaputra Delta (GMBD) has been modelled numerically by considering the effects of both the glacio-isostatic adjustment and the compaction of the underlying sedimentary column. A broad dataset of geological archives which includes more than 400 hand-drilled stratigraphic wells has been used for estimating the subsidence history, the volume of sediment deposited as well as the sediment mechanical properties in order to constrain the models. In the GMBD, the subsidence appears moderated during the Holocene, gently increasing seaward from < 0.2 mm/yr landward of the Hinge Zone, which can be considered as the northern limit of the subsiding delta plain, to  $2 \pm 0.7$  mm/yr in the middle fluvial delta to  $4 \pm 1.4$  mm/yr in the lower tidal delta. Sediment compaction behaviors are defined accordingly to the observed clay, silt and organic contents, and the rate of subsidence associated with compaction is determined. The effect of the sea water and sediment loads are considered in a glacio-isostatic adjustment model that considered the relative sea-level history since the last glacial maximum. Results suggest that about 2/3 of observed Holocene subsidence may be associated with the mechanical and chemical compaction of the underlying sedimentary column due to the load of sediment deposited while 1/3 of the observed subsidence may be associated to the glacio-isostatic adjustment. This study suggests that sediment compaction of the underlying sediment column is a main driving force of subsidence in delta plains, at least when the delta is analyzed at a relatively short but geological timescale.

**Mots-Clés:** Subsidence, Relative Sea Level, Delta Plain, Ganges, Brahmaputra, Meghna Delta, Holocene, Sediment compaction, Glacio, Isostatic Adjustements

<sup>\*</sup>Intervenant

## Contrôle de la dynamique sédimentaire par la déformation profonde : Le Nord-Ouest Bangladesh au Quaternaire

Jean-Louis Grimaud <sup>1</sup>, Celine Grall <sup>\*2</sup>, Steve Goodbred <sup>3</sup>, Ryan Sincavage <sup>3</sup>, Christopher Paola <sup>4</sup>, Jennifer Pickering <sup>5</sup>, Michael Steckler <sup>2</sup>, Leonardo Seeber <sup>2</sup>, M. Saddam Hossain <sup>6</sup>

<sup>1</sup> MINES ParisTech – PSL Research University, Centre de Géosciences – France

<sup>2</sup> Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) – États-Unis

<sup>3</sup> Vanderbilt University – États-Unis

<sup>4</sup> St Antony Falls Laboratory, University of Minnesota – États-Unis

<sup>5</sup> Shell Houston – États-Unis

<sup>6</sup> Dhaka University – Bangladesh

La caractérisation de la dynamique fluviale en amont des systèmes deltaïques est une clé pour comprendre le comportement à grande échelle des rivières ainsi que la répartition des sédiments associés, ce qui a des implications sur l'architecture stratigraphique et l'évolution de surface des deltas. En effet la capacité d'une rivière à se déplacer ou à persister au même endroit a des répercussions en aval. Au front des chaînes de montagnes, la déformation du socle et les apports latéraux par les cônes alluviaux peuvent dévier les rivières et affecter leur comportement.

Dans cette étude, nous nous intéressons au Nord-Ouest du Bangladesh, une région délimitée par les fleuves Brahmapoutre et Gange (Barind Tract, Méga-cône alluvial de la Tista). Un échantillonnage de 70 forages permet de contraindre la dynamique de surface et la géométrie des dépôts récents. Les principales sources des dépôts sédimentaires du delta sont évaluées à partir des concentrations en strontium, permettant notamment de tracer les limites du cône alluvial de la Tista. Nous montrons que la limite de ces dépôts est relativement stable malgré des variations au cours du temps. La distribution des sols et paléosols montre des différences marquées entre le cône alluvial et la zone Barind : le premier montre des alternances de sols avec différents degrés d'altération alors que la seconde zone est uniformément constituée de dépôts sableux surmontés par des sols montrant des altérations intenses. Une différence est également identifiée au niveau de la partie occidentale de la zone Barind qui est la plus altérée et semble constituer un haut topographique incisé par le Gange et la rivière Tista.

Pour terminer, le partitionnement des sédiments et l'évolution géomorphologique de la zone est analysée en s'attardant sur la distribution de la déformation flexurale dans la région. Cette dernière est étudiée en couplant un modèle statique simple de flexure 2D et une analyse des anomalies gravimétriques de la région. Il est proposé que la flexure d'avant-pays liée au poids de l'Himalaya sur la zone engendre le soulèvement relatif de la zone Barind, contrôlant le chemin des rivières et les dépôts associés.

**Mots-Clés:** Rivière, Tectonique, Fan alluvial, Altération de surface, Déformation flexurale

\*Intervenant

## Bilan "Source to Sink" à l'échelle d'un continent - L'Afrique : Dynamique du manteau et routage sédimentaire

François Guillocheau \*<sup>ψ1</sup>, Cécile Robin \*<sup>φ1</sup>, Guillaume Baby \*<sup>§1</sup>, Massimo Dall'asta <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Rennes – CNRS : UMR6118, Université de Rennes I – France

<sup>2</sup> TOTAL – France

A source to sink approach was performed at the scale of a continent – Africa - in the frame of the TopoAfrica project, with three main objectives (1) the characterization of the relative importance of deformation (uplift) and climate (precipitation) (2) the quantification of the deformation, its nature and causes, (3) the effect of those deformations on the past African topography and on the sediment routing system. We mainly focused on Western, Central and Austral Africa, characterized by anorogenic relief (plains and plateaus) record of long (several 100 km) to very long (several 1000 km) wavelength deformations, respectively of lithospheric and mantle origin. The sink measurement was based on the seismic stratigraphic analysis of numerous regional seismic lines (from the upstream part of the margin to the abyssal plain) merge of industrial and academic data, calibrated in ages and lithologies on reevaluated wells to get the best possible ages. Volumes measured between successive time-lines, were compacted for a comparison with solid eroded volumes.

The source study was performed using dated stepped planation surfaces (etchplains and pediplains) - key morphological features of Africa - mappable at catchments-scale. During Late Paleocene to Middle Eocene times, Africa experienced a very hot and very humid climate leading to the formation of an African-scale weathering surface (etchplain) known as the African Surface. This surface today deformed and preserved as large plains, domes or plateaus, can be used as (1) a marker of the very long wavelength deformations and (2) a reference level to measure eroded volumes since 40 Ma. Some other younger planation surfaces were also mapped of (1) Early Oligocene and (2) Late Miocene ages.

(1) Deformation (uplift) is the dominant control of the sediment budget. Climate (precipitation) changes only enhance or inhibit a deformation-controlled flux.

(2) The sources of clastic sediments are or closed marginal bulges or far field domes due to mantle dynamics with by-pass (transfer zones) along long-lasting polygenic surfaces located in.

**Mots-Clés:** Afrique, flux sédimentaire, géomorphologie, Cénozoïque, stratigraphie séquentielle

\*Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: francois.guillocheau@univ-rennes1.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: cecile.robin@univ-rennes1.fr

<sup>§</sup>Auteur correspondant: Guillaume.Baby@univ-rennes1.fr

## Stratigraphie d'un système fluviatile antécédent à l'initiation du rift de Corinthe (Grèce).

Romain Hemelsdael <sup>\*ψ1</sup>, Mary Ford<sup>φ2</sup>, Fabrice Malartre <sup>3</sup>, Julien Charreau <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Montpellier – Université de Montpellier : UMR5243 – France

<sup>2</sup> Université de Lorraine, CRPG, ENSG (Université de Lorraine, CRPG) – Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, UMR 7358 CNRS-UL – France

<sup>3</sup> GéoRessources - Ecole Nationale Supérieure de Géologie (ENSG) – Université de Lorraine, France

<sup>4</sup> Centre de recherches pétrographiques et géochimiques (CRPG) – CNRS : UMR7358, INSU, Université de Lorraine – 15 Rue Notre Dame des Pauvres - BP 20 54501 VANDOEUVRE LES NANCY CEDEX, France

Peu de rifts présentent l'opportunité d'étudier en détail l'initiation de l'étirement de la croûte continentale. Les relations tectono-sédimentaires dans les rifts continentaux sont souvent consacrées au remplissage sédimentaire depuis un système de drainage conséquent en réponse à la croissance des failles normales. La présence de rivières antécédentes y est souvent documentée mais leurs rôles dans la distribution des faciès restent mal connus. Pourtant, ce cas implique un flux sédimentaire possiblement important à l'initiation du rifting. Dans ce contexte, quelles sont les caractéristiques de l'antécédence dans l'enregistrement syn-rift, et comment évoluent les rivières antécédentes au cours de la croissance et la migration des failles normales? Le rift de Corinthe est un laboratoire naturel des relations tectono-sédimentaires. La zone d'étude est localisée dans la partie ouest de la marge sud du rift où affleure la base de la succession syn-rift. La datation des séries alluviales (magnétostratigraphie, micromammifères et charophytes notamment) et les corrélations stratigraphiques mettent en évidence le développement d'un système fluviatile entre ~3,6 et ~1,8 Ma à travers plusieurs blocs de failles actives. Les dépôts fluviatiles conglomeratiques deviennent plus fins vers l'aval où les rivières construisent des deltas dans un lac peu profond. Les caractéristiques majeures en faveur de l'antécédence sont : (1) la présence d'un axe fluviatile constant, (2) la présence de paléoreliefs (jusqu'à 500 m) hérités des Hellénides, (3) les changements de faciès observés à l'échelle du système fluviatile distributaire (15-30 km) et non pas à l'échelle des blocs (4-7 km de large). La stabilité du système fluviatile antécédent contrôle ici la localisation des dépocentres et des faciès syn-rift. Une autre spécificité de la zone d'étude est la quasi-absence de topographie générée par l'activité des failles, et donc l'enfouissement de celles-ci au cours de la subsidence. Un modèle alternatif de l'initiation du rifting continental est donc proposé (voir Figure). L'enfouissement des failles actives est expliqué par un important flux sédimentaire antécédent et la présence de blocs de failles étroits. Afin de tester cette hypothèse, la quantification du flux sédimentaire antécédent couplé à la modélisation numérique de l'activité des failles normales est à réfléchir en perspective de ces travaux.

**Mots-Clés:** Rift de Corinthe, système fluviatile, antécédence, flux sédimentaire, faille normale.

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: roman.hemelsdael@gm.univ-montp2.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: mary.ford@univ-lorraine.fr

## Changing provenance of the early Cretaceous rift and sag-related sediments of the Congo basin: Combining detrital zircon and apatite U-Th-Pb geochronology approach

Sage Kebi-Tsoumou <sup>\*1</sup>, Céline Ducassou C <sup>1</sup>, François Guillocheau <sup>1</sup>, Cécile Robin <sup>1</sup>, Nathan Cogné <sup>1</sup>, Marc Poujol <sup>1</sup>, Vincent Delhaye-Prat <sup>2</sup>, Julien Bailleul <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Geosciences-Rennes, UMR 6118 Université de Rennes1-CNRS – CNRS UMR 6118- France

<sup>2</sup> TOTAL EP – TOTAL, CSTJF, Pau – France

<sup>3</sup> Basins-Reservoirs-Resources (B2R), Geosciences Dpt, Institut polytechnique UniLaSalle – Institut Polytechnique UniLasalle – France

This study provides the first detrital zircon and apatite U-Th-Pb geochronology on the Berriasian prerift, Barremian synrift, and Aptian sag strata of the Congo basin, with the goal to reconstruct sediment provenance and relief evolution of the central South-Atlantic rifted- margin during the Early Cretaceous. Detrital zircons from 6 samples and detrital apatites from 3 samples collected from exploration wells and outcrops were analyzed for U-Th-Pb dating (LA-ICPMS). Six populations have been obtained: (1) Carboniferous- Permian, (2) Late Neoproterozoic-Ordovician, (3) early Neoproterozoic, (4) Mesoproterozoic, (5) Paleoproterozoic and (6) Archean.

The Berriasian prerift strata contain six populations of zircon (1 to 6) and five populations of apatite (1 to 5), interpreted as derived from various source terranes (e.g. Gondwanide, Brasiliano and Transamazonian orogenic belts) in South-America plate. This result implies a mixing of sediments from several distinct source regions and a long-distance transport, that is consistent with the deposition in a gentle proto-rift sag basin with a low relief.

Detrital zircon and apatite suites of Barremian synrift strata clearly contrast with those from prerift strata. These synrift strata contains three populations of zircons (4 to 6) and three populations of apatites (2, 3 and 5), which are consistent with local sediment sourcing from the marginal West-Congo belt, which was uplifted and exhumed along the rift flank. This imply a major change in provenance and a reorganization of the drainage pattern in response to fault bloc-tilting and rift-shoulder development during the Barremian main phase of the South- Atlantic rifting, resulting in the formation of significant topography relief.

Four samples from the Aptian sag strata yielded different age distributions, reflecting spatial and temporal changes in sediment provenance within the same stratigraphy unit. However, these populations also indicate local sediment sourcing from the West-Congo belts, implying no significant change in sediment provenance between the main rift phase and rift-drift transition phase. The different age distributions obtained for the Sag strata can be ascribed to the heterogeneity of the source terranes and to the occurrence of multiple catchment systems with small drainage areas.

This work emphasizes the importance of combining detrital zircon and apatite U-Th-Pb geochronology data for sediment provenance analyzing.

**Mots-Clés:** Detrital zircon, detrital apatite, U, Th, Pb geochronology, sediment provenance, South Atlantic rifted, margin

\*Intervenant

## Evolution du système source to sink d'un retroforeland durant la phase syn- orogénique. Le bassin d'Aquitaine à l'Eocène.

Eric Lasseur <sup>\*1</sup>, Justine Briais <sup>1</sup>, Mustapha Al Reda <sup>1,2</sup>, Alexandre Ortiz <sup>3</sup>, François Guillocheau <sup>3</sup>,  
Jocelyn Barbarand <sup>2</sup>, Nicolas Loget <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) -Orléans, France, France

<sup>2</sup> Géosciences Paris Sud (GEOPS) - Université Paris-Sud - Paris 11, CNRS: UMR8148 - Université Paris Sud, ORSAY Cedex, France

<sup>3</sup> Géosciences Rennes - CNRS : UMR6118, Université de Rennes I - France

<sup>4</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP) - CNRS : UMR7193, Université Pierre et Marie Curie (UPMC) - Fr

Bien moins connu que son équivalent sud du fait de la rareté des affleurements, le remplissage tertiaire du Bassin d'Aquitaine offre un bel exemple de remplissage d'un retroforeland qui peut être mis en relation avec la dynamique de l'orogène pyrénéen et celle du proforeland sud-pyrénéen. La synthèse des données de subsurface permet actuellement de reconstituer les principales phases de son évolution. L'Eocene correspond à la période syn-orogénique et à une décharge terrigène majeure en lien avec le début de l'exhumation des reliefs. Il se traduit par le comblement progressif d'est en ouest du bassin, tandis que le piedmont Est enregistre plusieurs séquences de mise en place de cônes alluviaux. L'objectif de ce travail est d'identifier les contraintes de premier ordre sur l'évolution du système source to sink au cours de cette période. Les dépôts carbonatés dominent largement durant le Paléogène. L'Yprésien est marqué par une progradation très rapide de dépôts deltaïques associée à (1) la première phase d'exhumation significative dans la chaîne, (2) au développement d'un bassin flexural de grande taille et (3) d'une contribution relativement importante de l'avant pays (4) dans un contexte climatique humide. Ce comblement a pour conséquence un très fort allongement de la zone de transfert entre pied-mont et sédimentation marine à partir du Lutétien, qui se marque par une modification importante du système source to sink. En effet, durant l'intervalle Lutétien moyen - Bartonien, la sédimentation marine est dominée par les dépôts carbonatés alors qu'une progradation majeure des cônes alluviaux est enregistrée dans le piedmont oriental, corrélée avec la phase majeure d'exhumation dans les Pyrénées. Cette situation suggère un fort tampon dans le transfert des sédiments. Nous montrerons que si une cause climatique peut expliquer une partie de la réduction d'apports vers le domaine marin, le tampon de la zone de transfert est en premier lieu dû à un contrôle tectonique marqué par une forte déformation dans l'avant pays qui a pour conséquence une forte segmentation du bassin et la génération de dépôts-centre isolés qui piègent une grande partie du sédiment. L'Eocene période s'achève par un ralentissement progressif de la subsidence à partir du Priabonien associé à une avancée importante de la sédimentation continentale et un comblement complet du bassin. Ces travaux de recherche ont été financés et réalisés dans le cadre du programme BRGM-TOTAL Source-to-Sink.

**Mots-Clés:** source to sink, transfert, pyrénées, bassin d'aquitaine, Eocene

\*Intervenant

## Système "Source to Sink" depuis 200 Ma : du bouclier Guyanais aux bassins de marges passives

Artiom Loparev <sup>\*1</sup>, Delphine Rouby <sup>1</sup>, Dominique Chardon <sup>1,2</sup>, Massimo Dall'asta <sup>3</sup>, Flora Bajolet <sup>1</sup>, Fabien Paquet <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – CNRS : UMR5563, Université Paul Sabatier - Toulouse III – France

<sup>2</sup> IRD - Université Ouaga1 Prof Joseph Ki-Zerbo – Ouagadougou, Burkina Faso

<sup>3</sup> Total Exploration-Recherche (Total EP) – Total EP – Pau, France

<sup>4</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) -- 3 avenue Claude Guillemin F45060 Orléans, France

L'objectif de notre étude est de comprendre le système *Source to Sink* du craton Guyanais depuis 200 Ma c'est-à-dire de déterminer l'histoire de l'érosion, du transport et du tri sédimentaire depuis les zones sources, les zones d'accumulation temporaires, jusqu'à la répartition ultime dans les bassins de marge passive du craton Guyanais.

La marge passive étudiée, localisée entre le front de subduction des Barbades à l'Ouest et l'embouchure de l'Amazone à l'Est, comprend deux bassins *offshores* : (i) le bassin de Guyana / Suriname (à l'Ouest du plateau de Demerara) et (ii) le bassin de Guyane Française et de Foz d'Amazonas (à l'Est du plateau de Demerara). La marge a connu une ouverture diachrone, avec une rupture lithosphérique continentale au Jurassique Sup. (165 Ma, ouverture de l'Atlantique Centrale) dans le bassin de Guyana / Suriname et (ii) une rupture à l'Albien Sup. (103 Ma, ouverture de l'Atlantique Equatorial) dans le bassin de Foz d'Amazonas.

Cette marge est constituée d'une alternance de segments divergents et transformants (parfois obliques) induisant une importante variation structurale le long de la marge. Les segments transformants présentent une zone de *necking* plus étroite que sur les segments divergents, les sédiments syn- et *early post-rift* sont moins épais et les pentes du plateau continental plus fortes.

L'histoire de l'accumulation des bassins *offshores* montre plusieurs variations avec : 1) une forte épaisseur des dépôts syn-rift (Trias - Jurassique) dans le bassin de Guyana / Suriname ;

- un établissement d'importantes plateformes carbonatées au Neocomien, Paléogène et Néogène, possiblement induites par une baisse du flux sédimentaires terrigène depuis le continent et (ou) le changement climatique ; 2) d'importantes *Mass Transport Deposits* lors d'une transpression à l'Aptien (à l'Ouest du plateau de Demerara) ; 3) de forts apports terrigènes (formant des nombreuses géométries de clinoformes progradantes et des chenaux turbiditiques) au Campanien, Maastrichtien et Miocène Supérieur ; ce dernier épisode, avec la plus forte contribution terrigène de l'histoire des bassins, résulte de la réorganisation du drainage des deux grands fleuves de la région : l'Orénoque et l'Amazone ; 4) une importante tectonique gravitaire affecte les forts apports du Miocène Supérieur du bassin de Foz d'Amazonas ; enracinée à la base des dépôts tertiaires, elle forme un domaine amont en extension (avec de forts rejets syn-sédimentaires) et un domaine aval en compression.

Du point de vue général, déformation liée au rifting structure et guide l'architecture stratigraphique dans les bassins de cette marge tout au long de leur histoire avec : (i) la zone de *necking* localisant les ruptures du plateau continental ; et (ii) les failles transformantes contrôlant la répartition des sédiments jusqu'au Paléogène.

**Mots-Clés:** Source to Sink, Craton Guyanais, Bassins de marge passive

\*Intervenant

## The North Pyrenean (Aquitaine Basin) post-retro-foreland evolution from Bartonian times – implications for the sediment routing system.

Alexandre Ortiz <sup>\*1</sup>, François Guillocheau <sup>1</sup>, Cécile Robin <sup>1</sup>, Eric Lasseur <sup>2</sup>, Justine Briais <sup>2</sup>, Charlotte Fillon <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Rennes (GR) - Université de Rennes 1, Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes, CNRS-CNRS : UMR6118 – France

<sup>2</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) – 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans, Cedex 2, France

<sup>3</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) – France

The North Pyrenean retro-foreland basin is connected westward to a passive margin –the Landais Plateau – that passed to the abyssal plain of the Biscay Bay, end of the sediments routing system. The objective of this work is (1) to establish the timing of the retro-foreland basin and its post-foreland evolution, (2) the timing of the Pyrenees growth view from the basin (volumes and types of sediment) and (3) the consequences on the sedimentary systems and their architectures. This study is based on a sequence stratigraphic and structural analysis of seismic lines both onshore and offshore calibrated in age, lithology and facies on industrial wells. The end of the Bartonian is characterized by an important change of the subsidence localisation in the flexural basin. It evolved to a piggy-back basin characterized by northward propagation of thrusts coeval with salt diapir growths that controlled the main depocenters that are not any more located in front of the North Pyrenean thrust. This differential subsidence ( $l=x10$  km) is active up to end-Chattian times, transition to a typical passive margin with a low subsidence flexural ( $l=x100$  km) regime over the former piggy-back area. Two main unconformities at Aquitaine Basin scale recorded deformation during this passive margin period, end Chattian (the base unconformity) and base Tortonian times. They both record uplifts of the Western Pyrenees. The modern relief of the western part of the Pyrenees is inherited from base Upper Miocene. These unconformities recorded changes of sediment routing systems. From Bartonian to end-Chattian times, the sediments are stored both onshore and offshore in the troughs between the thrust-controlled salt ridges. From end-Chattian to base Tortonian, sediments are mainly preserved offshore, with large low subsiding palustrine to lacustrine domains onshore. Since Late Miocene the onshore is a large by-pass domain with upstream river incisions along the Lannemezan and Ger Plateaus, feeding large progradational wedges reworked by deep-sea currents. This work is funded and carried out in the framework of the BRGM-TOTAL project Source-to- Sink.

**Mots-Clés:** Sink, Aquitaine, Bay of Biscay, Pyrenees, stratigraphy, seismic

\*Intervenant

## Quantifying biogenic versus detrital carbonates on marine shelf: an isotopic approach.

Virgil Pasquier <sup>\*1</sup>, Sidonie Révillon <sup>\*</sup><sup>2</sup>, Ludovic Mocochain <sup>φ3</sup>, Marina Rabineau <sup>§1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géosciences Océan (LGO) – Université de Bretagne Occidentale (UBO), CNRS : UMR6538 – France

<sup>2</sup> SEDISOR – Université de Bretagne Occidentale (UBO) – France

<sup>3</sup> UPMC (UPMC) – Université Pierre et Marie Curie [UPMC] - Paris VI, France

The terrigenous sedimentary budget of passive margin record variation in past sedimentary fluxes. As such, variations of past sedimentary fluxes over Earth history can be used to infer substantial past variations of earth surface deformation processes (i.e. tectonic), or climate change. Accurate estimation of sediment fluxes over various times scale- (i.e. years to millions of years) and space-scale (i.e. river catchment area to sedimentary basin) are therefore required. The main problem associated with flux quantification reconstructed using offshore sediment sequences is that they are only assuming accumulation of siliciclastic material (i.e. shales) by removing the carbonated fraction considered as in-situ production (i.e. CaCO<sub>3</sub>). This lead to estimation of bulk terrigenous solid volumes which can be compared to rock volume (a) eroded from land (i.e. in-situ cosmogenic production and/or modern sediment flux data in rivers) or (b) calculated from seismic stratigraphy studies. Yet such comparisons are not always persuasive as previously reported in the Gulf of Lion. Here we propose a new geochemical methodology to quantify the amount of detrital carbonates in comparison to biogenic carbonated in situ production. This isotopic approach enables taking into account the export of detrital carbonates, and investigate its effect on the Gulf of Lion sediment budget. This study is based on a 300m long sediment borehole deposited at the shelf break and covering the last 500 000 years (i.e. 5 glacial-interglacial periods). Because the time of deposition of those sediments is shorter than the residence time of strontium in the ocean we assumed that any changes in the strontium isotopic composition (<sup>86</sup>Sr / <sup>87</sup>Sr<sub>carb</sub>) preserved in carbonate reflects export of detrital carbonated lithologies from the catchment area. Our isotopic data (<sup>86</sup>Sr / <sup>87</sup>Sr<sub>carb</sub>) are significantly less radiogenic than modern seawater (i.e. 0.7082) and show fluctuations in agreement with stratigraphic and climatic variations. These results suggest an unsuspected high export of detrital carbonates from the catchment area during glacial (between 55 to 85% of the sedimentary carbonated fraction), and no negligible export during interglacial conditions (between 30 to 50%). This work provides some important perspectives in sediment flux calculation.

**Mots-Clés:** Detritic carbonates, strontium isotopes, sedimentary fluxes reconstructions

<sup>\*</sup>Intervenant

## Sediment transport from uppermost slope to abyssal plain in a carbonate environment

Audrey Recouvreur <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Natacha Fabregas <sup>1</sup>, Thierry Mulder <sup>1</sup>, Vincent Hanquiez <sup>1</sup>, Elsa Tournadour <sup>2,3</sup>,  
Jean Borgomano <sup>4</sup>, Margot Joumes <sup>1</sup>

<sup>1</sup> UMR 5805 Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux – Université de Bordeaux – France

<sup>2</sup> ADECAL Technopole - 1bis rue Berthelot - Doniambo - B.P. 2384 - 98 846 Nouméa, Nouvelle-Calédonie

<sup>3</sup> Service Géologique de Nouvelle-Calédonie (SGNC) – B.P. 465 - 98845 Nouméa, Nouvelle-Calédonie

<sup>4</sup> Centre européen de recherche et d'enseignement de géosciences de l'environnement (CEREGE) – IRD

The Carambar cruises 1, 1.5 and 2 were conducted between November 2010 and December 2016 in order to understand the sediment transfers between the platform and the deep basin in a modern carbonate environment. The large acoustic data set acquired during the Carambar cruises covers more than 20,000 km<sup>2</sup> of high resolution bathymetry and backscatter data and 5,400 km of very-high resolution seismic lines along the northeastern slope of the Little Bahama Bank (LBB). The LBB upper slope is dissected by numerous regularly spaced canyons. The lower slope corresponds to the valley feeding two giant canyons, the Great Abaco Canyon (GAC) and the Little Abaco Canyon (LAC), running parallel to the platform and with mouths fall within the Blake Bahama Escarpment (BEE). Surficial distribution of the acoustic facies and echo-facies clearly shows a wide variety of sedimentary processes along the slope. Its western part shows more evidence of deposits, such as sediment waves and base-of-slope deposits, and the eastern part, which is incised in the lower slope by the GAC and the LAC, seems to be more affected by erosion and by-pass processes. The variety in the physiography of the platform, bordered in the western part by a marine sand belt, and in the eastern part by tidal deltas and Islands, could influence the sediment export. Also, currents play an important role in sedimentation processes all along the slope and the abyssal plain. The Antilles Current, flowing northward trough the LBB, appears to affect a large part of the middle and lower slope and could affect the material transiting through the canyons incising the LBB upper slope. As no sizable sediment lobe can be observed on the bathymetric map, a deep current flowing southward along the BEE, the Western Boundary UnderCurrent, seem to impact the sediment transported through the great canyons to the abyssal plain. As a sediment deposition difference between the western and the eastern part of the slope can be observed trough the distribution of the acoustic facies and echo-facies, the hypothesis of a westward tectonic tilt of the bank could be reiterated.

**Mots-Clés:** Bahamas, slope, carbonates, canyons, sediment transport

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>✉</sup>Auteur correspondant: audrey.recouvreur@u-bordeaux.fr

## The Zambezi offshore system (delta to deep-sea fan): sink measurement – a record of the east Africa rift uplift and related climate changes

Cécile Robin <sup>\*1</sup>, François Guillocheau<sup>ψ1</sup>, Jean-Pierre Ponte <sup>1</sup>, Antoine Delaunay <sup>1</sup>, Massimo Dall'asta <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Géosciences – Université de Rennes I – France

<sup>2</sup> Total Exploration-Recherche (Total EP), Pau, France

Le delta du Zambèze, un des plus grands d'Afrique, est caractérisé par un profil de dépôt segmenté structuralement et topographiquement. Il est caractérisé par en amont un prisme deltaïque épais de 10 km, sans tectonique gravitaire, une zone subsidente intermédiaire d'Angoche et un fan d'eau profonde, séparé de la zone d'Angoche par une ride contouritique majeure. Le bilan des volumes sédimentaires préservés a été basé sur une analyse par stratigraphie sismique, d'une large base de données sismiques académiques et industrielles. Cette base de données a fait l'objet d'une réévaluation biostratigraphique et lithologique menant à un modèle d'âge actualisé. Les volumes sont mesurés entre isochrones successives, compactés pour être comparés aux volumes de roches solides érodées en amont. Les marges d'erreur sont évaluées en utilisant le code VolumeEstimator (Guillocheau et al., 2013). Quatre périodes clés sont identifiées dans l'histoire post-rift de cette marge : 94-66 Ma (Turonien-Maastrichtien) - premiers flux silico-détritiques, 66-34 Ma (Paléocène - Éocène) - très faible flux silico-détritique, 34-5,5 Ma (Oligocène-Miocène) - second flux silico-détritique majeur et 5,5-0 Ma (Plio-Pléistocène) - brusque augmentation du flux sédimentaire. Ces changements correspondent à des événements majeurs tectoniques et/ou climatiques. Une nouvelle reconstitution des variations climatiques a été basée sur une étude palynologique originale. Ces variations se résument ainsi : de 100 à 90 Ma - climat semi-aride, 90 Ma - brusque augmentation des précipitations vers un climat très humide à 40 Ma, les périodes de 40-30 Ma et de 15-11 Ma sont plus sèches, celles de 30-20 Ma et de 11-7 Ma sont de nouveau très humides. L'apport de sédiments silico-détritiques entre 94 à 66 Ma peut être mis en relation avec le soulèvement du Plateau sud-africain et à la reprise de l'érosion du Bushveld (Braun et al., 2014). Ceci a pu être forcé après 90 Ma par la rapide augmentation de l'humidité. La période comprise entre 66 et 34 Ma de faibles apports silico-détritiques est contemporaine et d'une période de quiescence tectonique, et de conditions climatiques très humides favorisant l'altération chimique et le développement de plateformes carbonatées. La seconde augmentation des apports silico-détritiques à 34 Ma résulte d'une surrection à l'échelle de l'Afrique, liée à la dynamique mantellique (Burke & Gunnell, 2008), ce qui va marquer le début de l'érosion mécanique des profils d'altération chimique éocènes. Enfin la rapide augmentation du flux détritique autour de 5,5 Ma correspond à une réorganisation majeure du bassin versant du fleuve Zambèze au moment de l'initiation du rift Malawi. Ces bilans ont été intégrés aux résultats obtenus sur les autres systèmes d'alimentation que représentent la marge ouest-malgache, la Rovuma et le Limpopo. Travail soutenu par projet PAMELA - PAssive Margin Exploration Laboratories, coordonné par TOTAL et l'IFREMER et les universités de Bretagne Occidentale, de Rennes 1, de Pierre et Marie Curie, du CNRS et de l'IFPEN.

**Mots-Clés:** Zambèze, delta, Crétacé, Tertiaire, flux sédimentaire

## Late Cretaceous-Paleocene drainage evolution of the Amazonian basins: insights from sediment provenance in the Huallaga and Madre de dios basins (Peru)

Martin Roddaz <sup>\*1,2</sup>, Mélanie Louterbach <sup>3</sup>, Christian Hurtado <sup>4</sup>, Roberto Ventura Santos <sup>4</sup>,  
Patrice Baby <sup>1</sup>, Pierre-Olivier Antoine <sup>5</sup>, Elton Dantas <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – IRD, Université Paul Sabatier - Toulouse 3, Observatoire Midi-Pyrénées, CNRS: UMR5563, France

<sup>2</sup> Laboratório de Geocronologia, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (Geochronos) – Brésil

<sup>3</sup> Repsol Exploración S.A. – Espagne

<sup>4</sup> Instituto de Geociencias, Universidade de Brasília, Campus Universitario Darcy Ribeiro ICC – Ala Central, CEP 70.910-900 Brasília, DF, Brésil

<sup>5</sup> Institut des Sciences de l'Évolution [Montpellier] (ISEM) – Université de Montpellier, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR226, CNRS: UMR5554 – Place E. Bataillon CC 064 34095 Montpellier Cedex 05, France

The northern part of South America has undergone several major changes in its tectonic setting since the Triassic, evolving from rifting to the development of a retroarc-foreland basin on its Andean margin, leading to margin extension and continental uplift following the breakup between Africa and South America. So far, it is unclear when and how these geodynamic events affected the paleo Amazonian drainage. In this study, we investigate the provenance of Triassic- Eocene sedimentary rocks deposited in the Peruvian Amazonian basin, based on their Sr-Nd isotopic compositions and U-Pb zircon dating. The Triassic-Jurassic samples from the Huallaga basin have  $\epsilon_{Nd}(0)$  values ranging from -7.9 to -10.0 and main U- Pb zircon peaks at 0.9–1.3 Ga (31-33%) and 0.5-0.7 Ga (21-28%) that suggest a mixed clastic supply from the Western and Eastern Cordillera within a back-arc setting. Samples from the Albian-Maastrichtian interval yield much lower  $\epsilon_{Nd}(0)$  values (-16.8 to -18.6) and a dominance of zircon grains derived from terranes in the easternmost Brazilian shield (Ventuari-Tapajos (2.0-1.82 Ga), RioNegro-Jurena (1.82-1.54 Ga) and Rondonia San Ignacio (1.54-1.3 Ga)), thus indicating a cratonic source for these sedimentary rocks. In the Madre de Dios basin, Early Maastrichtian sedimentary rocks have also low  $\epsilon_{Nd}(0)$  values (-15 to -16) and they are characterized by Precambrian-inherited zircon grains. These provenance data suggest the existence of a cratonic drainage system by Early Campanian- Maastrichtian times probably sourced by the Central Brazilian shield. Finally, the Early Paleocene-Eocene sedimentary rocks record the first arrival of Andean detritus in the Amazonian retroarc foreland, with  $\epsilon_{Nd}(0)$  values ranging between -5.6 to -12.0 and up to 16% of the zircon grains yielding ages younger than 120 Ma. These provenance data document the existence of a long-lived Aptian-Maastrichtian continent-wide cratonic drainage in the northern part of South America. The formation of a Late Maastrichtian-Early Paleocene mountain chain in the Peruvian Andes associated with the onset of provenance from the Andean orogenic belt suggest that the earliest Andean-Amazonian rivers are no younger than Late Maastrichtian-Early Paleocene.

**Mots-Clés:** Provenance, Sr, Nd isotopes, U, Pb dating, Amazon drainage, Late Cretaceous

\*Intervenant

## Geochemical evidence for large-scale drainage reorganization in Northwest Africa during the Cretaceous

Martin Roddaz \*<sup>1,2</sup>, Yannick Mourlot \*<sup>3,1</sup>, Guillaume Dera <sup>1</sup>, Gerome Calves <sup>1</sup>, Jung-Hyun Kim <sup>4</sup>, Anne-Claire Chaboureau <sup>3</sup>, Stéphanie Mounic <sup>1</sup>, Francois Raisson <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – IRD, Université Paul Sabatier - Toulouse 3, Observatoire Midi-Pyrénées, CNRS: UMR5563 -Toulouse, France

<sup>2</sup> Laboratório de Geocronologia, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (Geochronos) – Brésil

<sup>3</sup> Total EP – RD Frontier Exploration – France

<sup>4</sup> Korea Polar Research Institute(KOPRI) – Corée du Sud

West African drainage reorganization during Cretaceous opening of the Atlantic Ocean is deciphered here from geochemical provenance studies of Central Atlantic sediments. Changes in the geochemical signature of marine sediments are reflected in major and trace element concentrations and Strontium-Neodymium radiogenic isotopic compositions of Cretaceous sedimentary rocks from eight Deep Sea Drilling Project (DSDP) Sites and one exploration well. Homogeneous major and trace element compositions over time indicate sources with average upper (continental) crust signatures. However, detailed information on the ages of these sources is revealed by Neodymium isotopes (expressed as  $\epsilon$ Nd). The  $\epsilon$ Nd(0) values from the DSDP Sites show a three-step decrease during the Late Cretaceous: 1) the Albian-Middle Cenomanian  $\epsilon$ Nd(0) values are heterogeneous (-5.5 to -14.9) reflecting the existence of at least three subdrainage basins with distinct sedimentary sources (Hercynian/Paleozoic, Precambrian and mixed Precambrian/Paleozoic); 2) during the Late Cenomanian-Turonian interval,  $\epsilon$ Nd(0) values become homogeneous in the deep-water basin (-10.3 to -12.4), showing a negative shift of 2 epsilon units interpreted as an increasing contribution of Precambrian inputs; 3) this negative shift continues in the Campanian-Maastrichtian ( $\epsilon$ Nd(0) = -15), indicating that Precambrian sources became dominant. These provenance changes are hypothesized to be related to the opening of the South and Equatorial Atlantic Ocean, coincident with tectonic uplift of the continental margin triggered by Africa-Europe convergence. Finally, the difference between  $\epsilon$ Nd(0) values of Cretaceous sediments from the Senegal continental shelf and from the deep-water basins suggests that ocean currents prevented detrital material from the Mauritanides reaching deep-water areas.

**Mots-Clés:** Provenance, Sr, Nd isotopes, Northwest Africa, Cretaceous

\*Intervenant

## Passive margin stratigraphy for numerical models calibration: diffusion coefficient measurements in the Ogooué (Gabon) and Zambezi (Mozambique) deltas

Brendan Simon <sup>\*1,2</sup>, Cécile Robin <sup>2</sup>, Delphine Rouby <sup>1</sup>, Jean Braun <sup>3</sup>, François Guillocheau <sup>4</sup>,  
Xiaoping Yuan <sup>3</sup>, Massimo Dall'asta <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – Université Paul Sabatier - Toulouse 3, Observatoire Midi-Pyrénées,  
CNRS: UMR5563, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UMR239 – France

<sup>2</sup> Géosciences Rennes – CNRS : UMR6118, Université de Rennes I – France

<sup>3</sup> German Research Centre For Geosciences (GFZ) – Allemagne

<sup>4</sup> Géosciences Rennes (GR) – Université de Rennes 1, CNRS: UMR6118 – France

<sup>5</sup> Total Exploration-Recherche (Total EP) – Total EP – Pau, France

One major and under-appreciated aspect of stratigraphic modeling by diffusion process is the range of diffusion coefficients used to simulate natural examples without considering their meaning in term of transport and deposition processes. Most of the time, stratigraphic simulation tools are indeed used as a semi-inversion tool based on a "best-fit" approach to reproduce well-constrained sedimentary architectures. The aim of this work is to consolidate inputs of stratigraphic numerical modeling such as stratigraphic architectures, slopes of sedimentary systems, grain-size distributions and diffusion co-efficients calibrated on natural examples of passive margin deltas: the Plio-Pleistocene Ogooué Delta in Gabon and the Mio- to Pleistocene Zambezi Delta in Mozambique. We calculate diffusion coefficients from high resolution seismic stratigraphy and well analyses in three-steps: (1) calibration of sand/shale ratio variations (from wells) along the depositional profile; (2) restoration of the slope of sedimentary systems at time of deposition (including differential compaction corrections); (3) calculation of accumulation rates using a high resolution age model and quantification of uncompacted volumes for each time step in various stratigraphic context. Most of calculated diffusion coefficients range over two orders of magnitude ( $\times 10^{-4}$  to  $10 \text{ km}^2/\text{ka}$ ), in agreement with most of the published diffusion process-based stratigraphic modeling ( $\times 10^{-5}$  to  $\times 10 \text{ km}^2/\text{ka}$ ). Our results suggest that: (1)

neither the stratigraphic context nor the sand/clay ratio impact the diffusion coefficients but, (2) they strongly depend on the slopes along the depositional profiles. We also observe (3) a high variability of coefficients on the shelf and the basin floor that could reflect the occurrence of sedimentary processes that cannot be simplified to a simple diffusion (e.g. waves or flood on the shelf; oceanic currents, turbiditic channels or hemipelagites in the most distal domain). We use the diffusion coefficients values to calibrate the stratigraphic model developed by Yuan et al. (COLORS project, funded by Total) based on Bayesian inversions and optimization scheme of geometrical parameters of observed stratigraphic architectures (such as the angle of migration of the offlap-break or slope variations along depositional profiles).

**Mots-Clés:** Stratigraphy, Passive Margins, Diffusion Coefficient, Ogooué, Zambezi

\*Intervenant

## Late Miocene to present-day fluvial incisions in the Western Pyrenees: The record of local or regional uplift?

Jessica Uzel <sup>\*ψ1</sup>, Yves Lagabrielle <sup>1</sup>, Robert Wyns <sup>2</sup>, Philippe Steer <sup>1</sup>, Bertrand Nivière <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Rennes (GR) - Université de Rennes 1 - France

<sup>2</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières - France

<sup>3</sup> Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA) - France

The Pyrenean Range results from the collision between Eurasia and Iberia plates that started during the Santonian. The Pyrenean orogeny is considered to end in Early Miocene times, since from that period onwards, Iberia shows no more differential motion with respect to the rest of Europe and becomes part of the Eurasian plate. This coincided with the slowing down of African-Eurasian convergence. Nevertheless, the Pyrenean relief still displays an unexpected strong relief and a combination of various geological methods highlights the occurrence of local Upper Miocene to present-day uplifts in the Pyrenees (low temperature thermochronological dating, sedimentology, karstology, palynology, palaeoaltimetry). While it has already been studied extensively in the Eastern Pyrenees, fewer works refer to the Western Pyrenean uplift. Depending on the method considered, the timing and the vertical amplitude of this uplift differs.

We are initiating a geomorphological study of the incisions in the Western Pyrenees in order to constrain this post-shortening uplift. We focused on the Aspe Valley, where Miocene highly elevated - low relief erosion paleosurfaces observed as relicts on top of the interfluves have been strongly dissected. This dissection was achieved in several steps, including a low erosion episode, followed by an acceleration of erosion which could be attributed to the Late Miocene to actual Western Pyrenean uplift event. The sharp incisions are highlighted by erosion triangular facets which cannot be attributed to glacial erosion as they occur beyond the last glacial deposits. We attempt to reconstitute the landscape prior to this late incision in order to quantify the subsequent erosion and to try to link it with foreland deposits.

Evidence of a Late Miocene to present-day uplift is well described in the Eastern Pyrenees and at a larger scale, in the Central Massif, the peri-alpine area and in northern and central Iberia thus suggesting an uplift at a lithospheric scale. However, discrepancies in the uplift rates indicated by already published data are found at a kilometric scale in the Western Pyrenees, which leads us to consider a possible contribution of both local and regional processes to explain the recent incisions in the Aspe Valley.

This work is funded and carried out in the framework of the BRGM-TOTAL project Source-to- Sink.

**Mots-Clés:** Pyrenees, Postorogenic, Planation surfaces, Neogene uplift, Erosion faceted spurs

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: jessica.uzel@univ-rennes1.fr

## Late Miocene to Quaternary mixed hydrothermal/weathering processes in the Nefza-Sejnane polymetallic mining district (Tunisia) viewed by new goethite (U-Th)/He dating

Michèle Verhaert \* <sup>ψ</sup><sup>1</sup>, Cécile Gautheron <sup>2</sup>, Fakher Jamoussi <sup>3</sup>, Béchir Moussi <sup>3</sup>, Hedi-Ridha Chaftar <sup>4</sup>, Sophie Decrée <sup>5</sup>, Nouri Hatira <sup>4</sup>, Augustin Dekoninck <sup>1</sup>, Johan Yans <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Namur - Département de Géologie - ILEE (UNamur - ILEE) - Belgique

<sup>2</sup> Université Paris-Saclay - Géosciences Paris Sud (GEOPS) - CNRS : UMR8148, - Paris XI - France

<sup>3</sup> Centre de Recherches et des Technologies des Eaux de Borj Cédria (CERTE) - Tunisie

<sup>4</sup> Office National des Mines (ONM) - Tunisie

<sup>5</sup> Institut royal des Sciences naturelles de Belgique (RBINS) - Belgique

The Nefza polymetallic mining district is located in the Tellian "Nappe Zone" of northern Tunisia. The Cenozoic deposits overlay a basement made up of Albian-late Priabonian folded marls and Chattian-Burdigalian sandstones. Late Miocene felsic subvolcanic rocks and basaltic flows are regionally observed. New samples were collected for (U-Th)/He dating in the halloysite- Fe-Mn quarry of Tamra, the volcanic Fe-REE-U breccia of Oued Belif, and the Boukchiba and Ouchtata Fe localities, in order to constraint the hydrothermal and/or weathering episodes that affected this area and led to the formation of the various polymetallic deposits. First, X-ray diffraction and scanning electron microscopy have been used to identify the mineral phases of twenty samples, and ensure a considered choice of mineralogically unmixed samples. Three samples of goethite were selected at Tamra (from a vein, associated to hematite, and close to the Mn ore), two at Ouchtata (pseudomorphosis of pyrite and from a vein), one at Boukchiba (from a vein), and one at Oued Belif (from a vein). (U-Th)/He raw ages have been corrected to compensate He diffusion by applying a 10% correction. Tamra samples yielded following ages: ~ 1-3, 3-6, and 8-9 Ma, whereas samples from Ouchtata and Oued Belif delivered ages of ~ 0.8 Ma. The Boukchiba sample presents ages of ~ 4 and ~ 9 Ma. There were thus at least two episodes of Fe-rich fluids percolation in the Nefza district. The oldest episode (8-9 Ma), recorded at Tamra and Boukchiba, might be related to the Late Miocene magmatic activity and enhanced hydrothermalism. The latest episode (< 1 Ma), recorded at Ouchtata, Oued Belif, and Tamra, could correspond to goethite precipitation most likely linked to weathering. The 3 to 6 Ma ages of Boukchiba and Tamra probably represent a blend of the previously cited ages and of successive generations of goethite (and hematite, at Tamra). The 4.7 and 3.35 Ma 40Ar-39Ar ages obtained by Decrée et al. (2010) could be embedded within this sequence, with a precipitation of Mn-oxides between the two main episodes of Fe-(hydr-)oxides formation. The (U-Th)/He dating confirms that the Fe-Mn mineralization of Tamra is the result of mixed synsedimentary pedogenesis processes and later hydrothermal and meteoric fluids circulation. The compiling of all the ages suggests the successive formation of hydrothermal goethite and hematite, Mn-oxides, and goethite related to weathering.

References: Decrée et al. (2010) JAES 57, 249-261.

**Mots-Clés:** (U, Th)/He dating, iron (hydr, )oxides, goethite, supergene, hydrothermal, Tunisia

Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: michele-alexandra.verhaert@unamur.be

## **1.3. Matière organique dans les milieux sédimentaires passés et actuels**

## Caractérisation de la Matière Organique des sédiments des retenues hydrauliques par extraction séquentielle couplée à des dosages colorimétriques et à la mesure de la demande biochimique en oxygène

Sylvain Bascle <sup>\*1</sup>, Isabelle Bourven <sup>1</sup>, Valentin Robin <sup>1</sup>, Michel Baudu <sup>1</sup>

<sup>1</sup> GRESE - Agence de l'Eau Adour Garonne - France

Plusieurs études mettent en avant la part des retenues d'eau, d'une superficie de 0,1 à 10 km<sup>2</sup>, sur la production de gaz à effet de serre. Cette production est issue de la minéralisation de la matière organique (MO) accumulée dans le sédiment. Cette fraction organique (jusqu'à 24%) est composée en moyenne de 50% de Carbone (C) (Meyers et al., 2002). Le sédiment est un milieu complexe constitué de MO de nature hétérogène, interagissant avec une matrice minérale (MI), rendant sa caractérisation difficile. En effet, La MO sédimentaire est définie par son origine, sa biodisponibilité dans la MI et son environnement physico-chimique ; ces paramètres impactant son évolution. La nature chimique et la force d'interaction de la MO avec la MI affectent son affinité avec les microorganismes et donc le flux émissions de gaz à effet de serre. Cette étude consiste à établir une méthode de caractérisation de la MO des sédiments de retenues hydroélectriques en fonction de i) sa bioaccessibilité et ii) sa nature. Pour cela nous avons appliquée une méthode pédologique d'extraction séquentielle de la MO du sédiment en fonction de sa force de liaison croissante avec la MI selon 5 fractions : 1 " hydrosoluble " ; 2 " liaisons faibles " ; 3 " liaisons organo-métalliques " ; 4 " liaisons organo-minérales " et 5 " résiduelle " (extraites avec : 1- K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ; 2- Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> ; 3- Na<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> ; 4- NaOH) couplé ces extractions à des mesures de teneurs en C et N extraits ; de teneurs en protéines (PN), sucres (PS) et substances humiques (SH) ; et de demande biochimique en oxygène (DBO). Cette démarche a été appliquée à 5 échantillons issus de 3 sites, avec des taux de MO (8 à 20 %) et des ratios (C/N/P) différents. Les résultats montrent l'efficacité de la méthode (extraction de 60 à 70 % du C initial) et sa sensibilité (quantités de C extrait par phase variant de 1 à 3 entre échantillons). Les phases 2, 3 et 4 extraient le plus de C (~60%) et la MO " résiduelle " représente ~35% du C. L'évolution de la nature de ces 3 phases montre une augmentation du ratio C/N (de 10 à 27%) et des ratios (SH/PN/PS) similaires. L'analyse des DBO<sub>20</sub> du sédiment brut est en corrélation avec les quantités de C de toutes les phases ( $r^2$  allant de 0,8 à 0,9), hormis la phase 2. La DBO spécifique des phases (après chaque extraction) montre que la DBO la plus importante est associée à la MO " faiblement liée " (~40%), puis à la MO " résiduelle " (~30%) et qu'aucune corrélation n'existe entre la nature des phases et leur DBO spécifique. Ces données montrent néanmoins la stabilisation de la MO par complexes organométalliques, la minéralisation de MO résiduelle considérée comme réfractaire, ainsi que l'importance des inter- actions MI et MO faiblement liée dans son processus de minéralisation.

**Mots-Clés:** sédiment de retenue hydraulique, matière organique, extraction séquentielle, demande biochimique en oxygène, bioaccessibilité

<sup>\*</sup>Intervenant

## \*Intervenant Niveaux organiques du Crétacé inférieur : les leçons apprises de la " grande loterie " du Bassin Vocontien

Alexis Caillaud <sup>\*1</sup>, Melesio Quijada <sup>2</sup>, Armelle Riboulleau <sup>1</sup>, Jean-Yves Reynaud,  
 Viviane Bout-Roumazeilles <sup>1</sup>, François Baudin <sup>3</sup>, Thierry Adatte <sup>4</sup>, Anthony Chappaz <sup>5</sup>, Jean-Loup  
 Rubino <sup>6</sup>, Camille Frau <sup>7</sup>, Anthony Tendil <sup>8</sup>, Cyprien Lanteaume <sup>10</sup>, Jean-Noël Ferry <sup>9</sup>,  
 Nicolas Tribouillard <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – Université de Lille, UMR 8187 CNRS, ULCO – France

<sup>2</sup> Chemgeotech – Université de Lille, UMR 8187 LOG CNRS, ULCO – France

<sup>3</sup> Institut des sciences de la Terre de Paris (UMR 7193) – Université Pierre et Marie Curie Paris 6 – France

<sup>4</sup> Institut des Sciences de la Terre, Université de Lausanne (UNIL) – Géopolis, 1015 Lausanne, Suisse

<sup>5</sup> Department of Earth and Atmospheric Sciences, Central Michigan University – États-Unis

<sup>6</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) – France

<sup>7</sup> Groupement d'Intérêt Paléontologique – Science et Exposition, 60 bd Georges Richard, 83000 Toulon, France

<sup>8</sup> CEREGE – Aix Marseille Université, CNRS : UMR7330, IRD, Collège de France –Aix-en-Provence, France

<sup>9</sup> Total EP Research Development – TOTAL – CSTJF, Avenue Larribau, 64000 Pau, France

L'objectif de ce travail est d'étudier la sédimentologie des dépôts organiques dans un bassin hémipelagique (séries mésozoïques du Bassin du S-E de la France) afin de comprendre les processus de transport et de préservation de la matière organique (MO), ainsi que sa distribution dans les différents cortèges sédimentaires. Les résultats démontrent qu'il n'y a pas de relation entre le cortège organique et la granulométrie de la fraction terrigène ou la minéralogie de la fraction argileuse. Des turbidites sont présentes dans un niveau organique particulier, mais elles n'ont pas acheminé de MO terrestre dans le bassin ; au contraire, elles ont eu un rôle négatif sur la préservation du contenu organique. De la MO terrestre est observée dans certains niveaux organiques, mais sans lien avec des dépôts gravitaires, signifiant donc que la MO terrestre peut être transportée vers le domaine marin distal sans nécessairement impliquer des processus gravitaires. Il n'y a pas de lien évident entre la nature de la MO et les cortèges de dépôts dans les séquences stratigraphiques de 3e ordre. L'apport majeur de ce travail concerne l'approche multifactorielle de la sédimentologie de la MO en domaine marin, puisqu'il est mis en avant le rôle de 4 facteurs clés pour la formation de dépôts organiques en bassin hémipelagique : le taux de sédimentation, la nature intrinsèque de la MO, la productivité primaire marine, et les conditions d'oxygénéation du bassin. La formation d'un niveau organique s'enclenche par une combinaison favorable de 2 facteurs. Les niveaux organiques les plus riches en MO sont les événements anoxiques globaux, démontrant que l'anoxie est le facteur permettant les plus fortes accumulations organiques dans ce type de bassin sédimentaire.

**Mots-Clés:** Matière organique, sédimentologie, OAE

\*Intervenant

## Effect of organic matter chemical properties on thermal maturation of organic rich shales: experimental approach

Amélie Cavelan <sup>\*ψ1</sup>, Mohammed Boussafir <sup>1</sup>, Sandrine Delpeux <sup>2</sup>, Claude Lemilbeau <sup>1</sup>,  
Olivier Rozenbaum <sup>3</sup>, Fatima Laggoun-Défarge <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, UMR 7327 (ISTO) – BRGM, Université d'Orléans, CNRS (France)

<sup>2</sup> Interfaces, Confinement, Matériaux et Nanostructures (ICMN) – Université d'Orléans : UMR7374, CNRS : UMR7374 – France

<sup>3</sup> Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation (CEMHTI) – Université d'Orléans : UPR3079, CNRS: UPR3079 – France

Thermal maturity is often considered as the most important control factor of the development of the organic matter (OM) hosted porosity in gas shales systems. Nevertheless, this process is poorly understood and is insufficient to explain all the trends observed in natural sedimentary basins and others control factors as OM composition have thus to be considered. In view of the great contribution of OM-pores to gas storage capacity of these reservoirs, a better understanding of the role of OM properties and its chemical transformation is required. To this end, immature organic rich shales (Kimmeridge Clay, UK) were artificially matured using confined pyrolysis experiments to assess the porosity evolution from early oil window to dry gas zone. Porosity before and after maturation was measured by nitrogen adsorption and evaluated as a function of thermal maturity and shales composition (Organic petrography, Rock Eval analyses, XRD). The monitoring of OM chemical transformations was performed by GC/MS analysis of both oil and gas generated during pyrolysis experiments. The results revealed that the OM chemical transformations observed during pyrolysis experiments follow the trends observed in natural sedimentary basins. The Vitrinite reflectance (%Ro) estimated from Dibenzothiophenes and Phenanthrenes ratios confirmed that the desired degrees of maturity have been reached. OM- linked porosity, non-existent in immature shales, grows from the beginning of the wet gas zone to becomes predominant in gas-mature samples. However, a correlation between pore size variations and total organic carbon contents (TOC) is observed in gas-mature shales: samples containing a better OM intrinsic petrogenous quality (corresponding to high-TOC samples > 5 wt.%), developed smaller pores during maturation than low-TOC shales. These observations suggest that small variations in OM properties could greatly modified OM-pore network formed during thermal degradation process. Depending on the extent of these variations, the effect of maturity could probably be masked in some formations explaining the diversity of the trends observed in natural systems. Therefore, in this type II OM, thermal degradation process and OM intrinsic petrogenous quality seems to have a great control on the OM-pore genesis.

**Mots-Clés:** organic, rich shales, porosity, thermal maturity, OM properties, confined pyrolysis

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: amelie.cavelan@cnrs-orleans.fr

## Do experimental duration and temperature of confined pyrolysis experiments influence the evolution of the porosity of organic-rich shales?

Amélie Cavelan <sup>\*ψ1</sup>, Guillaume Pierre <sup>1</sup>, Mohammed Boussafir <sup>1</sup>, Sandrine Delpeux <sup>2</sup>, Claude Lemilbeau <sup>1</sup>, Olivier Rozenbaum <sup>3</sup>, Fatima Laggoun-Défarge <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, UMR 7327, INSU/CNRS (ISTO) BRGM, Université d'Orléans France

<sup>2</sup> Interfaces, Confinement, Matériaux et Nanostructures (ICMN) - Université d'Orléans : UMR7374, CNRS- France

<sup>3</sup> Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation (CEMHTI) - Université d'Orléans : UPR3079, CNRS: UPR3079 - France

Thermal maturity is often considered as the main factors controlling the formation of OM- hosted pores in gas shale systems. Nonetheless, this process remains poorly understood and controversial. The use of artificial thermal maturation could be a key to better understand the formation of shale porosity during oil and gas production. However, the faster experiment with higher pyrolysis-temperature compared to the slower kinetic condition of natural systems may modified the chemical transformations of OM and thus porosity after maturation. The effect of these opposite experimental conditions on shale porosity need to be quantified. For this purpose, confined pyrolysis of immature organic-rich shales (Kimmeridge Clay, UK) were performed under two experimental conditions : 325 °C during 3 days and 283 °C during 104 days. Porosity after maturation was measured by low pressure nitrogen adsorption and evaluated as function of thermal maturity, OM properties (Rock Eval) and pyrolysis duration. The OM chemical transformations were investigated by GC/MS analysis of oil and gas generated during pyrolysis experiments. First results confirm that both experiments have reached same degree of thermal evolution: the beginning of the oil window. Samples matured during 104 days exhibit lower gas concentrations, higher production indexes and higher concentrations of hopanes, n-alkanes, steranes and aromatic steroids. A longer maturation time seems thus to favour a more efficient transformation of polar components into saturated and aromatic hydrocarbons (HC). Two major effects can be noted on porosity: (i) a less important filling of mineral-linked porosity by non-extractible organic components leading to a greater mesopore volume after maturation, the formation of fine mesopores (< 10 nm) after maturation which do not exist for the shorter maturation time. Furthermore, the difference of HC concentrations between the two experiments, and the size of pores form after maturation seems strongly influenced by the OM quality. Experimental conditions of confined maturation and OM properties seems thus greatly influence the formation of shale porosity at the beginning of the oil widow.

**Mots-Clés:** porosity, organic rich, shales, confined pyrolysis, experimental conditions

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: amelie.cavelan@cnrs-orleans.fr

## Caractérisation géochimique et pétrographique du contenu organique des dysodiles du Barrémien inférieur du Liban

Layla El Hajj \*<sup>1,2</sup>, François Baudin <sup>2</sup>, Ralf Littke <sup>3</sup>, Arnaud Huguet <sup>2</sup>, Raymond Geze <sup>1</sup>,  
Sibelle Maksoud <sup>1</sup>, Fadi H. Nader <sup>4</sup>, Dany Azar <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Libanaise, Faculté des Sciences II, Fanar-Maten, P.O.box 26110217, Liban – Liban

<sup>2</sup> Sorbonne Université – CNRS, UMR 7193 ISTEPI, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France

<sup>3</sup> Energy Mineral Resources Group (EMR), Institute of Geology and Geochemistry of Petroleum and Coal, RWTH Aachen University, Lochnerstrasse 4-20, 52056 Aachen, Germany – Allemagne

<sup>4</sup> Geosciences Division, IFP Energies nouvelles – 1et 4 Avenue de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison Cedex- France

Les dysodiles sont des roches formées par la superposition de feuillets millimétriques, riches en matière organique et en fossiles, d'où leur intérêt pétrolier et paléontologique. Ils affleurent dans plusieurs localités du Liban, et se rencontrent dans des faciès lacustres au sein du " Grès du Liban ", formation fluvio-deltaïque datée du Barrémien inférieur. En plus de leur caractère lacustre, les dysodiles sont souvent associés à des cinérites ou trouvés à proximité de faciès volcanosédimentaires. Alors que les dysodiles ont été décrits dès la fin du 19e siècle, ils n'ont pratiquement pas été analysés ni sédimentologiquement ni paléontologiquement. Notre équipe a donc entrepris de les caractériser et de reconstituer les conditions de leur dépôt. Cette étude présente les résultats de la caractérisation de leur contenu organique par une approche géochimique (élémentaire et moléculaire) et de pétrographie organique. Parmi la dizaine de sites où les dysodiles ont été reconnus, nous étudions cinq affleurements du Nord au Sud du Liban. Ces faciès ont une extension limitée ( $\sim$  km<sup>2</sup>) et une épaisseur métrique. 33 échantillons de dysodiles renferment entre 3 et 24% de C organique (Corg). Le contenu en carbonates, et les indices d'hydrogène (IH) et d'oxygène (IO) sont variables d'un site à l'autre. L'IH peut ainsi atteindre 900 mg HC/g Corg, alors que l'IO présente des valeurs comprises entre 7 et 90 mg CO<sub>2</sub>/g Corg. Cela dit, la matière organique est de type I ou de type I oxydé, correspondant à une origine algale ou bactérienne, déposée en milieu lacustre. D'un point de vue optique, une matière organique amorphe fluorescente prédomine. Elle est formée d'une matrice de lamalginites qui montrent parfois des cyclicités. Les analyses moléculaires confirment l'origine algale (présence de stéranes et de n-alcanes à chaînes courtes) et bactérienne (présence d'hopanes) de la matière organique, mais révèlent également la variabilité des apports terrigènes en fonction du site étudié (présence de n-alcanes à chaînes moyennes). Par contre, les tétraéthers dérivant d'archées et de bactéries n'ont été détectés que dans un site au centre du pays. La singularité moléculaire de ce site accompagnée par les plus faibles IH, les IO les plus élevés, et un contenu presque nul en carbonate, amène à questionner le synchronisme du dépôt de dysodiles et/ou la présence de conditions spécifiques à chaque région du pays au cours du Barrémien inférieur.

**Mots-Clés:** Matière organique, dysodiles, Barrémien inférieur, Liban, type I, géochimie, pétrographie

\*Intervenant

<sup>✉</sup>Auteur correspondant: layla.el\_hajj@sorbonne-universite.fr

## Sedimentologic and paleoceanographic controls on the accumulation of organic matter along a river influenced margin: example of the Ogooue turbidite system

Salome Mignard <sup>\*1</sup>, Philippe Martinez <sup>1</sup>, Thierry Mulder <sup>1</sup>, Arnaud Huguet <sup>2</sup>, Thierry Garlan <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Bordeaux (UMR 5805 EPOC) – CNRS : UMR5805 – France

<sup>2</sup> Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols (METIS) – École Pratique des Hautes Études [EPHE], CNRS : UMR7619, Université Pierre et Marie Curie (UPMC) - Paris VI – France

<sup>3</sup> SHOM – 13 rue du Chatellier 29200 BREST, France

Accumulation of organic matter in deep-sea sediments is controlled by numerous and various environmental and depositional factors such as productivity, nutrient supply, terrigenous inputs, preservation, and sedimentation rate. These factors are susceptible to vary sharply in space and time provoking changes in the richness and type of organic matter buried in the sediments. For this study, we focused on the mud-rich Ogooue turbidite system located in the eastern part of the Gulf of Guinea and fed by the sediments of the Ogooue River. This specific environment is prone to receive organic matter from both the marine and terrigenous sources. Analyses have been led on ten sedimentary cores collected in different parts of the system from the shelf edge to the pelagic realm (> 4000 m water depth). Isotopic, palynofacies and biomarkers data allowed us to estimate the proportion of organic matter coming from both the marine productivity and the terrestrial inputs. Using the sedimentation rates calculated, we estimated the organic carbon accumulation for different time periods. On average, a two- to three-fold increase in organic carbon accumulation during the LGM compared to mid-Holocene conditions can be deduced from our cores. However, this cannot be attributed solely to one factor. Our results show that on the cores located on the slope and continental rise, the difference on the organic carbon accumulation is due to higher inputs of terrigenous organic carbon. These stronger supply results from the connection of the fluvial system to the Ogooue Fan allowed by the low sea-level. However, the morphology of the turbidite system and the specific pathways of the turbidite flows, that can efficiently transport terrestrial organic matter, create sharp spatial variation in the terrigenous organic matter repartition. The deepest cores located on the abyssal plain, on the contrary, are almost not affected by detrital sediment supply. Variations in organic carbon accumulation are thus only due to the quantity of marine organic carbon preserved in the sediment. This increase is probably to a great extent due to strongly enhanced export productivity during glacial period, especially for the sediments underlying the Atlantic Equatorial upwelling zone.

**Mots-Clés:** Organic carbon accumulation, Turbidite, Upwelling, Holocene, Last glacial maximum

<sup>\*</sup>Intervenant

## Hydrocarbures minéralisés (type épi-impsonite ?) dans les strates du Dévonien de la vallée de la Saoura (Sahara NW, Algérie)

Abdelkader Ouali Mehadji <sup>\*1,2</sup>, Abdelkader Abbache <sup>3</sup>, Ahmed Hamza Fellah <sup>4</sup>, Radia Tandjaoui <sup>2</sup>, Ahmed Yacine Khaldi <sup>5</sup>, Abderrahmane Mekkaoui <sup>4</sup>, Hicham Limam <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Paléontologie Stratigraphique et Paléoenvironnements (LPSP) - Algérie

<sup>2</sup> Université d'Oran 2 (LPSP- U Oran 2) - Algérie

<sup>3</sup> Université de Mascara (LPSPS- U Oran 2) - Algérie

<sup>4</sup> Université de Béchar (LPSP- U Oran 2) - Algérie

<sup>5</sup> Université de Djelfa (LPSP- U Oran 2) - Algérie

Le Dévonien de la vallée de la Saoura (NW du Sahara algérien), coupe de Marhouma (ou du "km30), montre quelques indices de suintements d'hydrocarbures minéralisés.

On rencontre des hydrocarbures (asphaltites, de type épi-impsonite ?) sous forme de : i) d'imprégnations et vernis dans divers faciès gréso-calcaires, ii) de grosses billes centimétriques de pyrite, iii) de galettes centimétriques et enfin iv) en blocs métriques. C Nous présenterons les différents niveaux d'occurrences (faciès et âges).

Les premières caractéristiques, de ce faciès que nous proposons comme dénomination "Marhoumite", font état d'une roche de couleur noire parfois à patine beige, de faible densité, de dureté entre 3 à 4, à cassure conchoïdale à terne, avec parfois des traces d'écoulement fluidal (contorsions).

De tels suintements sont connus ailleurs (Oklahoma en USA, en Turquie, en Pologne...) et se produisent souvent au centre des bassins sédimentaires où la subsidence est maximale (axe de subsidence) et le taux de sédimentation est élevé, favorisant un enfouissement rapide des niveaux riches en matière organique (en particulier du Silurien).

En outre, il se pourrait aussi que l'événement thermique soupçonné par Fabre (2005) est effectif, confirmé partiellement par Mekkaoui (201, p. 167) (...Quant aux basaltes de Damrane, les datations sont plus ou moins confirmées par cet âge absolu de 390 Ma (Eifélien)).

La matière organique des différents horizons du Silurien ( et Frasnien ?) ont dû bénéficier de cet apport thermique qui a accéléré la maturité des hydrocarbures. Les suintements et fuites se sont produits à la faveur des fractures et toutes les zones de faiblesses (discontinuités lithologiques). Des analyses doivent être réalisées pour déterminer la pétrographie et les compositions isotopiques de ces hydrocarbures minéralisés (= Marhoumite).

**Mots-Clés:** Saoura, siluro, dévonien, suintements, hydrocarbures

\*Intervenant  
oualimeha@gmail.com

## A multiproxy approach to characterize natural and human-perturbed coastal areas: insights from biomarkers and benthic foraminifera

Melesio Quijada <sup>\*ψ1</sup>, Fabio Francescangeli <sup>\*1</sup>, Eric Armynot Du Chatelet <sup>1</sup>, Gabriel Billon <sup>φ2</sup>,  
Fabrizio Frontalini <sup>3</sup>, Alain Trentesaux <sup>1</sup>, Vincent Bouchet <sup>1</sup>

<sup>1</sup> UMR LOG8187 – Université Lille - CNRS - ULCO, France

<sup>2</sup> Université de Lille / LASIR – CNRS, Université de Lille : UMR8516 – France

<sup>3</sup> Università degli Studi di Urbino "Carlo Bo", Dipartimento di Scienze della Terra, della Vita e dell'Ambiente  
(DiSTEVA) – Via Aurelio Saffi, 2, 61029 Urbino PU, Italie

The Hauts-de-France coasts are bordered by the English Channel and the North Sea. These coastlines present opposite characteristics with regard to human activities. The northern part has been affected by prominent commercial and industrial activities since the end of the 19th century. The southern part is less influenced by human pressure. The aim of this study is to carry out a preliminary assessment of the environmental conditions in five estuaries of the Hauts de France exposed to different degrees of anthropization (Aa, Liane, Canche, Authie and Somme). A multiproxy approach based on biomarkers and benthic foraminifera is here used to monitor the degree of human influence on the environment.

Several organic molecular tracers of fecal contamination were observed in the five areas, dominated by coprostanol and epi-coprostanol. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were also detected suggesting pollution by fossil fuels. Boulogne-Sur-Mer harbor showed the highest abundances of organic and inorganic pollutants followed by the Somme estuary.

Benthic foraminiferal assemblages are dominated by calcareous taxa. The highest values of diversity are found in Grand-Fort-Philippe and the lowest ones in Boulogne-Sur-Mer.

Three main benthic foraminiferal assemblages were identified reflecting different environmental characteristics at regional scale:

1) Boulogne-Sur-Mer is characterized by a low diversity in the living assemblages and the dominance of opportunist species (*H. germanica*, *C. excavatum* and *Ammonia tepida*) due to the high anthropogenic stress. It confirms the high content of heavy metals, manure derived contaminants, and PAHs.

2) The embankment area of Grand-Fort-Philippe is dominated by *Bolivina variabilis* and *B. pseudoduplicata* favored by high marine organic matter input. It suggests limited influence of anthropic contaminants.

3) Little impacted (low contaminants) and natural estuarine areas under macrotidal regime are largely dominated by *H. germanica* associated to Elphidiidae (*C. excavatum*, *C. williamsoni* and *margaritaceum*). These areas are enriched in terrigenous-derived organic matter.

**Mots-Clés:** biomarkers, foraminifera, Hauts, de, France, estuaries, contamination, multiproxy ap proach

\*Intervenant

## Les acides gras hydroxylés d'origine bactérienne : applicabilité comme marqueurs de température et de pH dans des sols des Alpes Françaises

Pierre Véquaud <sup>\*ψ1</sup>, Sylvie Collin <sup>φ1</sup>, Christelle Anquetil <sup>§1</sup>, Marina Seder Colomina <sup>¶1</sup>,  
 Jérôme Poulenard <sup>¶2</sup>, Pierre Sabatier <sup>\*</sup>, Imbert Partice <sup>2</sup>, Arnaud Huguet <sup>ψ1</sup>

<sup>1</sup> Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols (METIS) – Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, Ecole Pratique des Hautes Etudes, CNRS: UMR7619 – France

<sup>2</sup> Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne (EDYTEM) – Université Savoie Mont Blanc, CNRS: UMR5204 – France

Jusqu'à présent, les reconstitutions paléoclimatiques ont été principalement menées en milieu marin du fait de la disponibilité des marqueurs dans ces environnements. En contexte continental les variations climatiques passées sont bien moins comprises et présentent une forte hétérogénéité spatiale. Le développement de nouveaux traceurs permettant d'affiner notre compréhension des environnements continentaux passés apparaît ainsi crucial. À ce jour, les seuls marqueurs organiques de températures de l'air et de pH applicables aux reconstructions paléoclimatiques en milieu continental sont les alkyl tetraéthers de glycérol (GDGT) ramifiés issus de bactéries. Le développement de nouveaux marqueurs organiques en milieu terrestre est essentiel pour améliorer la fiabilité et la précision des reconstructions paléoclimatiques. Dans cet objectif, une étude (Wang et al., 2016) a montré le potentiel d'une autre famille de lipides en tant que marqueurs d'environnement en milieu terrestre : les acides gras 3-hydroxylés (3-AGH). Ces molécules, produites par les bactéries Gram-négatif, sont composées d'une chaîne de 10 à 18 atome de carbone et d'un groupement hydroxyle en 3<sup>e</sup> position. L'objectif de ce travail est d'examiner l'applicabilité des 3-AGH comme marqueurs de température de l'air et de pH en milieu terrestre. Dans ce but, 49 sols ont été prélevés entre 200 et 3 000 m d'altitude dans les Alpes françaises, au sein des massifs des Bauges et du Lautaret. L'abondance et la distribution des 3-AGH et des bactéries Gram-négatif ont été déterminées dans l'ensemble des sols afin d'évaluer la réponse de ces composés et de leurs microorganismes sources dans différentes conditions environnementales. Les GDGTs sont également analysés dans ces sols, permettant de comparer la réponse des deux types de lipides aux paramètres environnementaux. Les premiers résultats obtenus sur 17 échantillons de sols répartis le long du transect altitudinal des Alpes ne montrent pas de corrélation claire entre l'abondance relative des 3-AGH et le pH ou température de l'air, contrairement aux études précédentes (Wang et al., 2016). Ceci suggère que la structure des AGH pourrait être dépendante d'autres paramètres que la température et le pH : végétation, saisonnalité, humidité, diversité microbienne. Ces résultats devront être confirmés après les analyses géochimiques (3-AGH et GDGTs) et microbiologiques (abondance et diversité microbienne) effectuées sur l'ensemble des 49 sols.

**Mots-Clés:** Lipides, marqueurs d'environnement, sols

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: pierre.vequaud@upmc.fr

## Répartition spatiale de la matière organique et des caractéristiques sédimentologiques dans les sédiments intertidaux actuels des estuaires de la Canche, de l'Authie et de la Somme (Région Hauts de France)

Baptiste Voltz <sup>\*1</sup>, Lionel Denis, Swanne Gontharet, Luis Felipe Artigas, Lucie Courcot, Crouvoisier Muriel, Alice Delegrange, Gwendoline Duong, Cédric Tallobre, Vincent Cornille, Françoise Henry, Sylvie Phillippe

<sup>1</sup> Université du Littoral Côte d'Opale (ULCO) – Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences : LOG UMR 8187 – France

Situés à l'interface entre les environnements continentaux et marins, les estuaires sont considérés comme l'un des écosystèmes les plus dynamiques au monde qui assurent une forte production et le transfert d'importantes quantités de matière organique (MO) des continents vers l'océan. Même si les estuaires sont l'une des zones les plus étudiées en termes de sources de la MO particulière et son recyclage, notre compréhension de sa dynamique au sein de ces zones et du rôle des estuaires dans son devenir reste fragmentaire. Une étude a été réalisée dans le but d'identifier les variations spatiales des caractéristiques de la MO au sein des sédiments de surface des trois principaux estuaires (Canche, Authie, Somme) de la Manche Orientale ainsi que l'influence des principaux paramètres sédimentaires et biologiques sur sa production et sa dégradation. Ces estuaires, qui font partie intégrante du Parc Naturel Marin des Estuaires Picards et de la Côte d'Opale, sont dits "picards" en raison de la présence de fleuves au débit modeste, d'un régime macro/mégalidal, ce qui leur confère une géomorphologie particulière. Pour cela, des prélèvements de sédiment de surface (0-1 cm de profondeur) ont été réalisés en domaine intertidal, entre Février et Avril 2018, dans chacun de ces estuaires, à marée basse, le long de plusieurs transects. Ces transects, transversaux au fleuve, s'étendent de la partie la plus haute de l'estran (prés salés) au chenal du fleuve en passant par une zone de vasière nue. Ces échantillons ont permis (1) de quantifier la MO accumulée dans les sédiments de surface et d'identifier son origine (aquatique versus terrestre) et (2) de déterminer certains paramètres sédimentologiques (granulométrie, contenu en eau) et biologiques (quantité de chlorophylle a et phéopigments associés). En parallèle, un suivi des caractéristiques biogéochimiques de la MO particulière apportée par les fleuves a été réalisé tous les mois depuis Janvier 2018. Ce suivi inclut une détermination de la quantité et de l'origine de la MO contenue dans la matière en suspension ainsi que l'observation du phytoplancton et la quantification de la biomasse chlorophyllienne. Les résultats préliminaires ont permis d'établir une cartographie des zones présentant des lithofaciès différents au sein de chacun des estuaires ainsi que de mieux comprendre les facteurs contrôlant la distribution spatiale de la MO des sédiments de surface des zones intertidales et supratidale de ces trois estuaires.

**Mots-Clés:** matière organique, granulométrie, variabilité spatiale, sédiment de surface intertidaux, microphytoplancton, estuaires

\*Intervenant



## 1.4. Evolution des systèmes côtiers actuels et anciens & Dynamique sédimentaire

## PHYSIC: Hydro-sedimentary processes under extreme tidal currents

Olivier Blanpain <sup>\*1</sup>, Gaspard Minster <sup>2</sup>, France Floc'h <sup>3,4</sup>, Nicolas Le Dantec <sup>5</sup>, Amandine Nicolle <sup>6</sup>,  
 Jean Francois Filipot <sup>7,8</sup>, Yann Mear <sup>9</sup>, Nicolas Chaplain <sup>10</sup>, Thierry Garlan <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) - Ministère de la Défense -BREST, France

<sup>2</sup> ENSTA Bretagne - ENSTA - France

<sup>3</sup> Université de Bretagne Occidentale (UBO), UMR6538 Plouzané, France

<sup>4</sup> IUEM - Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM) - France

<sup>5</sup> Cerema - France

<sup>6</sup> ensta bretagne - ENSTA Bretagne, Ensta-Bretagne - France

<sup>7</sup> FRANCE ENERGIES MARIES - France Energies Marines - France

<sup>8</sup> FEM - France Energies Marines - France

<sup>9</sup> Iusac - Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM) - France

<sup>10</sup> iXSurvey- France

Extreme tidal environments can experience high sediment load of grains as coarse as pebbles. Sediment interactions with tidal stream turbines could affect engineering performance, maintenance operations and finally energy yield. The PHYSIC project aims to qualify and quantify this load in the Alderney race (English Channel).

In order to reach this goal, six frames supporting a dozen of sensors (3D videos, camera, ADCPs, ADVs, hydrophones, accelerometers, Aquascat, sediment trap) have been moored this winter. Fifty pebbles with acoustic tags have been launched on the sea bottom. The data obtained should brought information on the load, the size and the height of the particles in movement.

Meanwhile, a modelling effort has been undertaken: a physical one in a current flume to study the transition from rolling to saltation according to the current velocity, the grain diameter and the bottom roughness; a grain scale numerical one to enlarge the flume results to the extreme tidal current conditions; and finally a regional one to evaluate bedload and suspension load of different particle sizes.

First half of the project is reached, sensors have been recovered at the end of May and the regional model is on its way!

**Mots-Clés:** Sediment load, Tidal stream, Modelling, Instrumentation

<sup>\*</sup>Intervenant

## La dynamique sédimentaire autour de l'île d'Yeu : approche intégrée du continuum terre-mer.

Elsa Cariou <sup>\*1,2</sup>, Agnès Baltzer <sup>ψ1</sup>, Quentin Dupuis , Equipe Or2c , Equipe Odyséyeu , Equipe Haliotis

<sup>1</sup> Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique (LETG - Nantes) – CNRS : UMR6554, INSU, Université de Nantes, – France

<sup>2</sup> Laboratoire Géosciences Océan (LGO) – Université de Bretagne Sud, Université de Brest, Institut de Recherche pour le Développement, CNRS, LABEXMER – France

L'île d'Yeu est l'une des îles les plus exposées aux houles et aux courants du littoral atlantique français. Malgré cette position et l'intensification des activités humaines, sur les côtes comme en mer, les abords de l'île d'Yeu ne font aujourd'hui l'objet d'aucun véritable suivi scientifique environnemental intégré (faunes + flores + sédiments + eaux), et la répartition actuelle des stocks sédimentaires et/ou leur dynamique entre l'île et la côte vendéenne n'ont été que peu étudiées en détails (Vanney, 1977, Le Mauff, 2018).

Dans ce contexte, assurer une gestion littorale cohérente et anticiper ou suivre l'impact environnemental de futurs projets côtiers s'avère impossible pour les décideurs et les gestionnaires. Dans le cadre du programme OR2C, initié par le laboratoire LETG (Université de Nantes), et financé par la Région des Pays de la Loire, la mission OR2C - juin 2018, à bord de la vedette océanographique Haliotis a permis d'acquérir de nouvelles données de nature des fonds, de bathymétrie, d'imagerie et de sismique très haute résolution. Ces données permettent de cartographier les zones de dépôts sédimentaires, d'en estimer les volumes, et d'établir, en mer, un "état initial" dont le suivi dans le temps éclairera les échanges et transits sédimentaires autour de l'île.

En parallèle, l'utilisation du Ground Penetrating Radar de l'IFSTTAR Bouguenais en juillet 2018, dans le cadre du programme de recherches ODySéYeu, permettra de caractériser les stocks sédimentaires à terre. La combinaison de ces observations à terre et en mer permettra de considérer le continuum terre-mer dans son ensemble et d'illustrer les échanges de sédiments entre terre et mer selon les différents types de rivages qui jalonnent l'île d'Yeu, facilitant une gestion littorale intégrée.

**Mots-Clés:** sables, dynamique sédimentaire, gestion littorale

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: Agnes.Baltzer@univ-nantes.fr

## Morphological evolution of a tidal inlet revealed by field measurements and modelling

Eric Chaumillon \*<sup>1</sup>, Thibault Coulombier \*<sup>ψ1</sup>, Xavier Bertin \*<sup>φ1</sup>, Anouk De Bakker \*<sup>§2</sup>

<sup>1</sup> Littoral ENVironnement et Sociétés - UMR 7266 (LIENSs) – Université de La Rochelle, CNRS : UMR7266 – France

Owing to the strong currents induced by both waves and tides, tidal inlets are among the most dynamic coastal environments. For instance, large shoreline evolutions can be observed along coasts adjacent to tidal inlets, with erosion and accretion alternating over time.

A tidal inlet located in SW France (Maumusson Inlet) is the focus of this study, and was chosen for three reasons: (1) adjacent beaches were shown to be one of the fastest evolving coastlines of France (up to > 30 m/year); (2) it is close to our lab and this allows frequent measurements adapted to meteorological conditions; (3) the long-term evolution of this inlet is well documented. Three bathymetric surveys were conducted in November 2016 (single beam survey, R/V L'Estran), May 2017 and 2018 (interferometric sonar, R/V Haliotis), simultaneously with topographic surveys (photogrammetry from a Unmanned Aerial Vehicle) and hydrodynamic measurements (ADCP and pressure sensors). Those data were used to calibrate the 2DH SCHISM Modelling system, which couples a hydrodynamic circulation model, a spectral wave model and a sediment transport and bed update model.

The analysis of bathymetric data show: (1) the development of medium subaqueous dunes (wavelength < 10 m) superimposed on large (10 m < < 100m) and very large subaqueous dunes (wavelength > 100 m) in the main inlet channel and on the flood delta; (2) opposite ebb and flood-dominated dunes in the main channel ; (3) flood-dominated dunes along the flood ramp ; ebb-dominated dunes along the ebb spits.

Repetitive bathymetric surveys show: (1) the asymmetry inversion of medium dunes; (2) the migration of large & very large subaqueous dunes (2 m / 5 days); (3) the sediment infilling of the main channel and accretion of the ebb delta between November 2016 and May 2017; (4) the down drift migration of the main inlet between May 2017 and May 2018 (150-200 m/year); the erosion of the top of the flood tidal delta and the infilling of the main adjacent channel between May 2017 and May 2018.

Strong similarities are observed between residual transport deduced from slip-face orientations of large and very large subaqueous dunes and 2DH modelled sand transport. Some differences are observed at the top of the ebb delta. They are explained by the inversion of large dune polarity during a tidal cycle in very shallow waters.

**Mots-Clés:** tidal inlet, bathymetry, repetitive surveys, subaqueous dunes, sand transport, modelling

\*Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: thibault.coulombier@univ-lr.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: xavier.bertin@univ-lr.fr

<sup>§</sup>Auteur correspondant: anouk.de\_bakker@univ-lr.fr

## Dynamiques et évolution du littoral. Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel

Anaïs Daburon <sup>\*1</sup>, Amélie Roche <sup>1</sup>, Alain Trentesaux <sup>\*2</sup>, Caroline Maurin <sup>3</sup>, Yann Deniaud <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (Cerema) – Cerema Normandie-Centre : chemin de la Poudrière, CS 90245, 76121 Le Grand-Quevilly cedex, France – France

<sup>2</sup> UMR 8187 CNRS (LOG) – Université des Sciences et Technologies de Lille - 59655 Villeneuve d'Ascq, France

<sup>3</sup> Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement - Centre Val de Loire (DREAL Centre-Val de Loire) – DREAL Centre-Val de Loire – France

La collection " Dynamiques et évolution du littoral " rassemble et synthétise les connaissances actuellement disponibles sur le littoral français et pointe les secteurs et thématiques où les connaissances sont faibles ou en voie d'approfondissement. Le premier fascicule de cette collection correspond aux travaux et principaux résultats obtenus dans le cadre de l'actualisation du "Catalogue sédimentologique des côtes françaises" sur la province sédimentaire s'étendant de la frontière belge à la pointe du Hourdel. Également appelée côte d'Opale, cette province présente trois unités morphosédimentaires aux paysages diversifiés : les deux plaines maritimes picarde et flamande, composées de systèmes dunaires étendus, isolant de la mer des territoires bas et potentiellement submersibles, et une côte rocheuse à falaises, le Boulonnais. Les mouvements de sédiments correspondent essentiellement à la remobilisation d'un matériel hérité, non renouvelé, car les faibles apports actuels sont liés au recul des côtes à falaises et aux sédiments transportés par la dérive littorale vers le nord-est depuis la province méridionale adjacente. Les obstacles à la dérive littorale constituent les limites des huit cellules hydrosédimentaires bien définies sur la province ; la dernière limite, au niveau de la frontière belge, est fictive car les sédiments transportés par la dérive littorale continuent vers l'est en mer du Nord, vers la Belgique et les Pays-Bas. Certaines de ces limites sont constituées par des ouvrages : la province comporte des secteurs fortement anthropisés et cumule près de 130 km linéaires d'ouvrages et aménagements côtiers, impactant près de 60 % de son littoral. Sur l'ensemble de son linéaire, la province présente néanmoins 40 % de ses côtes mobiles en accrétion sur les dernières décennies, un des taux les plus élevés de métropole. Cependant, ce chiffre masque des différences très marquées, avec des taux de recul du trait de côte pouvant dépasser localement les 3 m/an en moyenne comme en baie d'Authie ou en baie de Wissant. Les perspectives d'élévation rapide du niveau de la mer, liées au dérèglement climatique, laissent craindre une fragilisation d'espaces littoraux déjà contraints ; cependant, les évolutions climatiques en cours sont soumises à de nombreuses incertitudes et les efforts de mesure et de capitalisation des connaissances sur le devenir des territoires littoraux doivent être poursuivis pour adopter des stratégies de gestion locales durables.

**Mots-Clés:** Dynamique sédimentaire, Érosion, Évolution du trait de côte, Gestion durable du littoral, Sédiments, Ouvrages côtiers, Aménagement du littoral, Changement climatique

<sup>\*</sup>Intervenant

## The long-term retreat of Normandy coastal chalk cliffs (France) under the influence of highstand sea-level variations

Timothée Duguet <sup>\*1</sup>, Anne Duperret <sup>1</sup>, Stéphane Costa <sup>2</sup>, Vincent Regard <sup>3</sup>, Grégoire Maillet <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC) – Université Le Havre Normandie, CNRS : UMR6294 – France

<sup>2</sup> Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique (LETG) – CNRS : UMR6554 – France

<sup>3</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – UMR5563 – France

<sup>4</sup> LPG-BIAF – Université Nantes Angers Le Mans, CNRS : UMR5563 – France

Coastal chalk cliffs of Normandy extend along 100 km long. The present-day rocky coastline morphology is made of vertical cliffs that suffer high to moderate mean erosion rates varying from 0.10 m/y to 0.30 m/y from place to place (Costa et al., 2000). Unfortunately, current short-term cliff retreat rates measurements allow to reach only about 150 years time span, in the best cases. In order to estimate long term erosion rates, Holocene evolution of coastal chalk cliffs have been assessed. Some Land-Sea Digital Elevation Model (DEM) have been produced along at various places of the Normandy coastline using a merge of high resolution Lidar and shallow bathymetric data compiled from 3 coastal cruises, offshore Ault, Criel-sur-Mer, Senneville-sur-Fécamp and Etretat- Cap d'Antifer. Each study site is constituted by a cliff/shore platform system cut into the Upper Cretaceous Chalk of the Paris Basin. The cliff toe is connected to a rocky shore platform with a low slope (0.8 to 2.1°) that extends seaward on a distance varying from 280 to 800 m.

The combined geological analysis of cliffs and shore platforms has evidenced a strong link between shore platform width and the chalk lithological units in relation with geotechnical properties of the Chalk Formations. The shore platform seaward edge (SPSE) is always marked by a 2 to 3 m high step located around 8 to 12m depth (NGF), in the subtidal coastal area. Locally, a lower rocky flat surface extends between 14 and 17m in depth with a width varying between 200 and 900 m. This lower flat surface is also limited seaward by a 3m high step (OS) down to 20m depth. At every study site, the seaward edge is marked by an abrupt morphology that appears completely disconnected with the initial geological structure, such as chalk type and chalk deformation, and fracturation in particular. The SPSE is always nearly parallel to the coastline except in one place where it is interrupted by a scar and old scree, indicative of a past chalk cliff collapse. Therefore the SPSE evidences the paleolocation of the cliff when the sea-level was located at its foot. The SPSE constant 8-12m depth may be related to the MFS evidenced at the same range of depth in the Seine bay and dated at 6.5 ky (Tessier et al., 2012). In Normandy, the transition between the Transgressive System Track and the Highstand System Track evidenced within a context of sediments supply, may be marked by the start of the shore platform formation within a context of sediments supply lacking. Similarly the localised 17-20m depth OS that ending the lower 14-17m depth flat rocky surface may be shaped during a MIS 5 high stand sea-level.

For the last 6.5 ky, the coastal chalk cliffs of Normandy retreated with rates from 0.04m/y to 0.12m/y that are lower than the historical ones. Therefore, historical observations reveal that cliff retreat rates have subsequently accelerated and confirmed observations of the South coast of Great Britain (Hurst et al., 2016).

**Mots-Clés:** chalk cliffs, erosion, highstand sea, levels, shore platform

\*Intervenant

## Fluctuations of the piezometric level and wind accumulations during the Quaternary period in the maritime Jeffara (Southeastern of Tunisia)

Amira Essid \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unité de Recherche Géomatique des Géosystèmes (UR11ES41) - Tunisie

In southeastern Tunisia, the Quaternary record starts with a thick unit of silty-clays and conglomerates. Attributed to the lower to medium Pleistocene, this unit is related to a fluvial-lacustrine system emplaced in a warm and relatively humid climate with strong seasonality, as evidenced by the abundance of carbonate concretions. Largely distributed in the coastal Jeffara plain, this unit is incised by numerous wide valleys in which the Upper Pleistocene and Holocene deposits are accumulated. These latter deposits mainly correspond to fine-grained aeolian sands and coastal sebkha silty-gypsum clays, with intercalated fluvial-lacustrine deposits reflecting brief wet periods. The Upper Pleistocene eolian sands correspond to mostly lowstand systems tracts. They were supplied during periods of lower sea level by north-easterly winds blowing on the exposed wide continental shelf. By contrast, the wet, fluvial-lacustrine deposits correspond to late transgressive to highstand systems tracts. At least three climate-driven sequences, likely corresponding to orbital cycles, are recorded in the Upper Pleistocene substage. The degradation and preservation of these sequences are tightly controlled by tectonic uplifts and related ground water-table fluctuations, the latter controlled to first glacioeustatic changes and second to rainfall variations. The Holocene is marked by a wetter period of eolian dune stabilization, preceding the return to more arid conditions. This climate-stratigraphic record is in overall agreement with that provided by other Quaternary records of the interior of the Sahara, giving way to a generalized facies model of the land-sea transition in arid settings.

**Mots-Clés:** Jeffara, Gulf of Gabes, Quaternary, climate change, fluvial, lacustrine deposits, eolian deposits, tectonics, incised valley, base level.

Intervenant

## Benthic foraminifera and historical pictures as tools to monitor the recent landscape evolution of estuarine areas: a case study from the Canche Estuary (eastern English Channel, France)

Fabio Francescangeli <sup>\*1</sup>, Melanie Portela <sup>1</sup>, Eric Armynot Du Chatelet <sup>1</sup>, Gabriel Billon <sup>2</sup>,  
Thorbjørn Joest Andersen <sup>3</sup>, Vincent Bouchet <sup>1</sup>, Alain Trentesaux <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire LOG Université de Lille UMR LOG 8187-France

<sup>2</sup> Université de Lille / LASIR - CNRS, Université de Lille : UMR8516 - France

<sup>3</sup> University of Copenhagen (KU) - Danemark

Palaeoenvironmental reconstructions take place especially in coastal marginal areas, interesting for their high variability in term of physical-chemical-biological parameters, rapid landscape transformations, sea level changes, human interactions and accessibility. A multi-proxy approach based on benthic foraminifera, sediment grain-size, total organic carbon content, major and trace element concentrations, and radionuclide activities investigated the recent landscape evolution of the Canche Estuary (Hauts-de-France).

In estuarine areas, the difficulty in collecting undisturbed non reworked sediment cores often leads to unreliable radiometric dating. We faced this issue when dating sediments based on  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  activities in the present study in La Canche estuary. As an alternative method, aerial historical pictures were used for the first time as a dating method. The sediment core represents a typical fining-upward succession in a low-impacted tide-dominated estuary filled by progradation. In the bottom part of the core, foraminiferal assemblages are dominated by *Cribroelphium excavatum* and *Elphidium margaritaceum*. *Haynesina germanica* is the most abundant taxon in the middle part of the core while *Entzia macrescens* is dominant in the upper part. In approximately one hundred years, an initial naked tidal flat has been gradually replaced by a vegetated salt marsh.

The present study sheds light on how background knowledge provided by historical sources (such as pictures, maps, or chronicles) could be relevant to enhance modern palaeoenvironmental reconstructions. When dating is not provided by classic radiometric methods, historical pictures (<100 years) may constitute a valuable alternative method to reconstruct recent environments.

**Mots-Clés:** benthic fossil foraminifera, aerial historical pictures, Hauts, de, France, radiometric dating issues, Canche Estuary, multiproxy approach

\*Intervenant

## Investigating the physical processes of turbidite-homogenite deposition

Pierre Henry <sup>\*1</sup>, Doriane Delanghe <sup>1</sup>, Sinan özeren <sup>2</sup>, Nurettin Yakupoğlu <sup>3</sup>, Cecilia Mchugh <sup>4,5</sup>, Christian Crouzet <sup>6</sup>, Gülsen Uçarkuş <sup>3</sup>, Kürşad Kadir Eriş <sup>3</sup>, Mehmet İlicak <sup>2</sup>, M. Namık Cagatay <sup>3</sup>

<sup>1</sup> CEREGE - CNRS : UMR7330, Aix Marseille Université, France

<sup>2</sup> Istanbul Technical University, Eurasia Institute of Earth Science (ITU) – Turquie

<sup>3</sup> Istanbul Technical University, EMCOL (ITU) – Turquie

<sup>4</sup> Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University – États-Unis

<sup>5</sup> Queens College, CUNY, Flushing NY 11367 – États-Unis

<sup>6</sup> Institut des sciences de la Terre (ISTerre) – Université de Savoie Mont Blanc, CNRS : UMR5275 – Technolac 73376  
Le Bourget du Lac cedex, France

Turbidite-homogenite (T-H) deposits are generally interpreted as the consequence of sediment remobilization on slopes during earthquakes. T-H deposits deviate from the Bouma sequence in several ways, displaying a sharp boundary between one or several laminated basal layers and a relatively thick layer of fine silts and clay size particles designated as the homogenite layer. Processes generally invoked for turbidite-homogenite formation involve episodes of tractive transport under oscillatory currents (forming a laminated turbidite layer) followed by the settling of a cloud of suspended particulate matter (forming the homogenite). It is yet unclear whether seiche oscillations or tsunami waves following earthquakes can cause oscillatory currents in deep basins vigorous enough to explain the laminations, and to which extent the settling of the dilute cloud observed in the water column after earthquakes contributes to the deposition of thick homogenites, which may have thicknesses of several tens of centimeter to several meters and appear to seal off topography. One objective of the MAREGAMI (ANR/TUBITAK) project and EMSO monitoring in the Sea of Marmara is to gain a better understanding of these processes combining analysis of sediment cores, monitoring at the seafloor and numerical modeling. Settling of a dilute cloud (with suspended particle volume fraction of 10% or less) is modelled with Stokes law, yielding predictions of the evolution of the grain size distribution within the homogenite layer. On the other hand, hydrodynamic modeling is used to relate current velocity at the seafloor with the amplitude of seiche oscillations and associated tsunami waves. Comparison with results of core analysis suggests that the contribution of the suspended matter cloud to the thickness of T-H layers is probably relatively small and that some homogenites may be more akin to mud flow units. Caution should also be taken that amalgamation of gravity flows and combination of proximal and distal sediment sources may contribute to layering and to atypical grading patterns within the turbidite units.

**Mots-Clés:** turbidite, homogenite, seismoturbidite, suspension settling, sediment transport

\*Intervenant

## Short-term sedimentary evolution and morphodynamic processes of the upper part of the Capbreton submarine canyon

Léa Guiastrennec-Faugas <sup>\*ψ1</sup>, Hervé Gillet <sup>φ1</sup>, Ricardo Silva Jacinto <sup>2</sup>, Bernard Dennielou <sup>2</sup>,  
Vincent Hanquiez <sup>1</sup>, Laure Simplet <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux – UMR5805 EPOC, University of Bordeaux,  
Pessac, France - France

<sup>2</sup> Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer – France

The Capbreton canyon stands out by its deep incision through continental shelf and slope and its present turbidity activity. The head of the canyon is disconnected from the Adour River since 1310 AD but is located close enough to the coast to allow a direct supply by longshore drifting. Gravity processes in the canyon body are well described, but many questions remain for the head and the upper part of the Capbreton submarine canyon such as: Do any others supply sources of the canyon exist (lateral supply)? Which processes provide sediment transfer from the head to the canyon? Our study is based on the analysis and comparison of eight multibeam bathymetric survey acquired between 1998 and 2018. This data set covers the same area of the upper part of the canyon and allows the comparison and morphologic follow-up of this outstanding dynamic area. This proximal dataset is completed by two distal bathymetric surveys on a meander at 1500m water depth acquired in the canyon in 2015 and 2016. The morphological evolutions in the upper part of the canyon over the last 20 years especially affect the floor of the talweg and the canyon head. Times of flat talweg are observed, succeeded by periods of talweg surincision (low lateral terraces and narrow talweg). The surincisions are induced by regressive erosion and are evidenced by regressing knickpoints suggesting a return to the equilibrium profile. But, first accurate volume quantification in the canyon talweg has been undertaken. This underlines an alternation of filling and erosive period in the canyon axis and a continuous sediment deposition in the canyon head during the last 20 years. Times of flat talweg (1998) suggest a filling associated with a full emptying of the canyon head, and periods of talweg surincision (2010 to present day) might be associated with a partial emptying of the canyon head.

Recent surveys show that regressive erosion is higher around the flanks meanders where key morphodynamic processes are generated. Those hypotheses will be discussed, especially for the deeper part of the canyon, in the light of currentmeter data (ADCP) recorded during winters 2015 and 2016 at 555, 900 and 1500m water depth in the canyon. Analysis of these currentmeter data is in progress and may reveal some interesting points.

**Mots-Clés:** Capbreton canyon, time, lapse bathymetry, knickpoints, regressive erosion, volume quantification, morphodynamic processes

Intervenant

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: lea.guiastrennec-faugas@u-bordeaux.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: herve.gillet@u-bordeaux.fr



## Synergistic approach for monitoring of land cover of Mekong delta using Sentinels -1 and 2 data with object-based machine learning algorithms

Chi Nguyen Lam <sup>\*1</sup>, Simona Niculescu <sup>ψ1</sup>, Bernard Pottier <sup>φ2</sup>, Hiep Xuan Huynh <sup>§3</sup>

<sup>1</sup> Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique (LETG) – CNRS : UMR6554 – France

<sup>2</sup> Laboratoire des sciences et techniques de l'information, de la communication et de la connaissance (Lab-STICC) – CNRS : UMR6285 – France

<sup>3</sup> Service de Physique de l'Etat Condensé (SPEC) – Commissariat à l'Energie Atomique – France

In this work the synergistic use of Sentinel-1 and 2 are combined in the context of land use/cover (LULC) mapping in Mekong delta. The objective was to develop a new Object-based Image Analysis (OBIA) approach for mapping wetland areas using Sentinel-1 and 2 data. The two popular machine learning algorithms (Support Vector Machines-SVMs and Random Forests- RFs) are used and their results are compared. Results showed that two-part image segmentation could efficiently create object features across the study area. For both classification algorithms, an increase in overall accuracy was observed when the full synergistic combination of available datasets. A statistically significant difference in classification accuracy at all levels between SVMs and RFs was also reported, with the latter being up to 85% higher.

**Mots-Clés:** delta du Mékong, changement de l'occupation/usage du sol, synergie Sentinel, 1 et sentinel, 2

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: simona.niculescu@univ-brest.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: Bernard.Pottier@univ-brest.fr

<sup>§</sup>Auteur correspondant: hxiep@gmail.com

## Evolution des bancs sableux du nord de la France depuis le 19ème siècle et influence sur l'hydrodynamisme côtier

Alexa Latapy <sup>\*ψ1</sup>, Jean-Baptiste Robin-Chanteloup <sup>2</sup>, Amandine Nicolle <sup>3</sup>, Arnaud Hequette <sup>1</sup>,  
Nicolas Pouvreau <sup>4</sup>, Nicolas Weber <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - UMR 8187 (LOG) - Université du Littoral Côte d'Opale,  
Université de Lille, CNRS : UMR8187 - France

<sup>2</sup> Université La Rochelle - Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique - France

<sup>3</sup> ENSTA Bretagne - Ministère des Armées - France

<sup>4</sup> Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) - Ministère des Armées - France

La façade nord des Hauts-de-France correspond à une frange côtière de 60 km orientée OSO- ENE ouverte sur la mer du Nord. De nombreux bancs sableux sont présents le long de ce littoral où ils forment des corps sédimentaires massifs parallèles à obliques au trait de côte, localisés sur l'avant-côte jusqu'à plusieurs dizaines de mètres de profondeur.

Des campagnes bathymétriques ont été réalisées depuis les années 1830 afin de sonder les fonds marins dans cette région. Les résultats de ces levés hydrographiques sont conservés en format papier dans les archives du Shom. Un premier travail d'inventaire, de numérisation et de calage vertical de ces documents a été réalisé. L'analyse des évolutions bathymétriques révèle une forte variabilité de la morphologie de l'avant-côte depuis le 19ème siècle, notamment en raison de la mobilité des bancs pré-littoraux.

Nous présentons les résultats obtenus sur deux sites côtiers (dans le secteur de Calais ; à l'Ouest du port de Dunkerque) et un site plus au large, le banc du Dyck, situé à une dizaine de km de la côte. La bathymétrie complexe de ces 3 secteurs révèle une forte variabilité latérale et longitudinale des bancs sableux sur les deux siècles d'enregistrement. Deux périodes se démarquent : milieu et fin du 19ème siècle avec une phase d'accrétion des bancs et une migration des bancs vers le large ; puis au milieu du 20ème siècle avec une migration généralisée des corps sableux vers la côte. Le climat de houle et les courants sont modélisés avec TELEMAC sur les bathymétries des différentes époques afin d'apprécier les interactions entre l'évolution morphologique de l'avant-côte et l'hydrodynamique littorale.

**Mots-Clés:** morphologie des petits fonds, bancs sableux, Hauts de France, mer du Nord, hydrodynamisme

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: alexa.latapy@gmail.com

## Observation continue de la turbidité près du fond dans les eaux côtières en Bretagne

Elodie Marches <sup>\*ψ1</sup>, Vincent Perier <sup>1</sup>, Olivier Morio <sup>1</sup>, Thierry Garlan <sup>1</sup>, André Lusven <sup>1</sup>, Valérie Cariou <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shom - EPA Shom - 13 rue du Chatellier 29200 BREST, France

Le projet ROEC (Réseau d'Observation haute fréquence en Environnement Côtier) est un projet régional qui vise à suivre l'état environnemental des masses d'eaux côtières autour de la Bretagne. Différents paramètres physiques, hydrologiques ou biogéochimiques sont ainsi mesurés sur une longue période de temps (plusieurs années) afin d'évaluer la part naturelle de la part anthropique dans les changements et de la variabilité de ces paramètres. Ce projet repose notamment sur le développement de structures benthiques permettant d'observer la turbidité près du fond. L'objectif est d'acquérir des mesures de turbidité de manière continue à raison d'une mesure toutes les 20 min. Sept sites d'observation ont été définis en considérant leur intérêt écologique ou leur proximité à une activité anthropique connue. Suite à la première année d'observation, les résultats montrent que le suivi haute fréquence sur une longue période de temps est possible et pertinent mais qu'il comprend des contraintes et des limites comme les moyens à la mer, l'autonomie des capteurs ou encore les problèmes de biofouling des capteurs. Les sept sites montrent une importante variabilité temporelle de la turbidité près du fond avec des périodes très fortement turbides entraînant la saturation du capteur. L'interprétation de ces séries temporelles montre de bonnes corrélations entre les pics de turbidité et certains facteurs environnementaux (débits fluviaux, houle, courants). Cependant certaines augmentations de turbidité restent inexpliquées en considérant uniquement les forces naturelles.

L'influence anthropique semble jouer un rôle dans les variations de turbidité près du fond mais cela nécessiterait d'être étudié plus profondément. Cependant, le manque d'accessibilité aux données haute résolution (spatiale et temporelle) des activités anthropiques ne permet pas d'établir un lien irréfutable entre les augmentations de turbidité et ces différentes activités.

Les longues séries temporelles constituent cependant une bonne opportunité de comprendre la dynamique sédimentaire à travers l'observation de la matière en suspension et ces résultats seront utiles pour la calibration des modèles hydro-sédimentaires. La mise en évidence de l'impact anthropique, quant à elle, reste encore un réel challenge.

**Mots-Clés:** turbidité, suspension, observation continue, série, temporelle, milieu côtier

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: elodie.marches@shom.fr

## Mechanical decoupling between sand injectites and hostrock inferred from coupled AMS and microtectonic analyses. (Sisteron, SE Basin, France)

Caroline Mehl <sup>\*1</sup>, Philippe Robion <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mines ParisTech - PSL Research University – MINES ParisTech, PSL Research University – France

<sup>2</sup> Géosciences Environnement Cergy (GEC) – Université de Cergy Pontoise – France

Injectites intruding the cretaceous Blue Marls formation are used to follow the mechanical behavior of clastic heterogeneities regards to the marly hostrock during stress loading. What propose here to test the AMS as a method to deconvolute the signal between tectonic and sedimentary in clastic injectites. AMS is thus determined in both the clastic injections and their host rock. AMS characterization is coupled with microtectonic analysis to decipher the tectonic signal recorded by the area of interest. By comparison of both methods, the associated sedimentary and tectonic signals may be deconvoluted in injectites.

The magnetic fabric recorded in the hostrock (in the limy beds and in one turbidite of the Blue Marls) is interpreted as recording Layer Parallel Shortening striking NW/SE. NW/SE compression is elsewhere consistent with fold axes in the area of interest and compression axes deduced from inversion of kinematic data recorded by fault planes.

Orientations of joints and veins recorded in injectites completely differ from those of the hostrock: they seem conditioned by the orientation and dip of the injectite himself, arguing for a mechanical decoupling between the host rock and injectites. Magnetic fabrics collected in injectites are interpreted as the result of complex sedimentary processes dated back to the injection. They did not allow determining the flow direction for sand emplacement but they confirm the mechanical decoupling.

**Mots-Clés:** AMS, paleostresses, injectites

<sup>\*</sup>Intervenant

## Un analogue de piège stratigraphique : modélisation 3D des canyons incisés dans les Grès d'Annot et comblés par les Schistes à blocs, secteur de la Bonette (Alpes du Sud)

Louison Mercier <sup>\*1</sup>, Jean-Loup Rubino, Laurent Daghdevirenian, Sébastien Migeon, Romain Bousquet, Olivier Broucke

<sup>1</sup> TOTAL -- France

Les Schistes à blocs constituent la formation terminale de la succession tertiaire du bassin foredeep sud-alpin, dans le SE de la France. Depuis leur définition et à cause de leur emplacement sous la nappe de l'Autapie, les Schistes à blocs ont été considérés comme un olistostrome. Ils sont séparés de la formation sous-jacente des Grès d'Annot par une surface d'incision majeure, fortement indentée sous forme de marches, qui incise de plus de 400 m les turbidites priaboniennes. Lors de ce projet, l'hypothèse testée est l'incision des turbidites par des canyons, par la suite comblés par les Schistes à blocs.

Notre travail s'est basé sur l'utilisation combinée du MNT et de la cartographie afin de construire un projet sous SIG, permettant la modélisation 3D de l'incision dans le secteur de la Bonette, nous aidant à comprendre l'orientation et les dimensions des canyons. Afin de comprendre l'architecture interne du remplissage, vingt-neuf sections lithologiques de 5 à 110 m d'épaisseur ont été levées.

La reconstruction 3D de la surface d'érosion montre une tendance sud-nord des morphologies de canyons situées sous le massif de Restefond. Les canyons ont été par la suite comblés par une première phase de sédimentation hémipelagique alternée d'événements turbiditiques en bancs sableux fins et de glissements argileux /et ou de débrites à éléments gréseux. Ces dépôts sont probablement liés à des glissements et des processus gravitaires affectant la surface d'érosion en marches. Elle fut succédée par le dépôt d'une mégabrèche au toit irrégulier composée d'imposants olistolithes calcaires; circonscrite aux fonds de canyons. La mégabrèche fut ensuite drapée par une troisième unité composée majoritairement de débrites à éléments gréseux, mais aussi de turbidites gréseuses en bancs minces, d'hémipelagites et de chenaux turbiditiques. Une surface d'érosion interne au remplissage a par la suite incisé l'unité 3, puis fut recouverte par le dépôt d'un second niveau de mégabrèche étendu à tout le secteur. Enfin, les canyons étant comblés et abandonnés, une dernière unité les a recouverts. Elle est constituée de l'alternance d'hémipelagites et d'olistostromes, ces derniers composés de blocs de Flysch à Helminthoïdes provenant de la nappe. La partie supérieure des Schistes à blocs a par la suite été mélangée tectoniquement lors de l'avancée de la nappe pour former un faciès de type " Wildflysch ". Les deux mégabrèches calcaires devaient quant à elles provenir d'un paléorelief, exposé à l'érosion sous-marine dans une partie plus amont du système de canyons.

**Mots-Clés:** piège stratigraphique, analogue, canyons sous, marins, Schistes à blocs, Grès d'Annot

\*Intervenant

## \*Intervenant Rôle de la composition sédimentaire dans la dynamique et l'architecture interne des barrières littorales : Approche par modélisation physique

Alissia Rieux <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Pierre Weill <sup>1</sup>, Dominique Mouazé <sup>1</sup>, Bernadette Tessier <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C) – Normandie Univ, UNICAEN, UNIROUEN, CNRS : UMR6143 – France

Les barrières littorales dominées par les vagues sont des systèmes dynamiques qui répondent aux fluctuations du niveau marin à différentes échelles de temps, causées par les tempêtes, les marées (échelle journalière à décennale) et les variations climatiques (échelle centennale à millénaire). Elles sont composées de sable silicoclastique, de débris bioclastiques ou d'un mélange des deux. Dans certains environnements de productivité biologique intense, tels que la Manche, les débris coquilliers, essentiellement dérivés de mollusques, peuvent largement dominer la composition globale des sédiments côtiers. Avec le temps, l'évolution des facteurs naturels et anthropiques peut entraîner une variation de la proportion entre les grains silicoclastiques et coquilliers. L'objectif général de cette étude est de comprendre comment une modification de la composition sédimentaire peut affecter les processus impliqués dans la construction des barrières côtières et potentiellement leur stabilité. Suite à une première étude expérimentale en érodimètre qui montre des différences significatives de comportement hydrodynamique entre des débris bioclastiques provenant d'espèces variées de mollusques (Rieux et al., *Sedimentology*, sous presse), un ensemble d'expérimentations a été réalisé en canal dans le but de reproduire des morphologies de barrières à partir de mélanges de matériel bioclastique (B) et silicoclastique (S) en proportion variable. Le matériel coquillier provient de la baie du Mont-Saint-Michel tandis que le matériel silicoclastique consiste en un mélange de sables marins (sable de Fontainebleau et sable de Bayeux). Au total, trois mélanges sédimentaires ont été recomposés : 90% B - 10% S ; 50% B - 50% S ; 25% B - 75% S. La morphologie des barrières a été reconstituée par photogrammétrie et par mesures au télémètre laser ; l'architecture interne a été étudiée à partir de photographies et de laquer-peels. Les résultats montrent une grande variabilité dans l'évolution des barrières en fonction de la nature du matériel sédimentaire, notamment au niveau des vitesses de migration, de la morphologie et de l'architecture interne des barrières modélisées. Ces différences s'expliquent principalement par une modification de la porosité des dépôts et par les processus de tri qui s'effectuent au niveau des zones de déferlement et de swash dans lesquelles la vitesse de chute des particules joue un rôle prépondérant. Les barrières riches en débris coquilliers amortissent l'énergie des vagues et le transport des sédiments se réalise sur de plus courtes distances. Ces phénomènes engendrent une aggradation des particules bioclastiques en haut de plage, une pente plus forte et des submersions de crête peu fréquentes. Au contraire, un banc riche en sable, et donc moins poreux, entraîne de nombreuses submersions de crête, un déplacement des particules sur de plus grande distance et des pentes globalement plus faibles.

**Mots-Clés:** Canal à houle, mélange bioclastique / silicoclastique, washover, transport sédimentaire

\*Intervenant

<sup>1</sup>Auteur correspondant: alissia.rieux@unicaen.fr

## Impacts des changements climatiques et des activités humaines sur la dynamique de remplissage sédimentaire d'une lagune méditerranéenne (Mar Menor, Espagne)

Bernadette Tessier <sup>\*1</sup>, Laurent Dezileau <sup>1,2</sup>, Otmane Raji <sup>3</sup>, Angel Perez-Ruzafa <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C) – UMR6143, CNRS : - France

<sup>2</sup> Géosciences Montpellier – Université de Montpellier : UMR5243, CNRS : France

<sup>3</sup> Geology Sustainable Mining (UM6P, Benguerir) – Maroc

<sup>4</sup> Departamento de Ecología e Hidrología, Regional, Universidad de Murcia- Espagne

Les systèmes lagunaires sont des zones côtières très vulnérables en raison notamment des risques de submersion marine mais également d'inondations et fortes décharges sédimentaires par les bassins versants. C'est en particulier le cas des lagunes méditerranéennes qui par ailleurs sont fréquemment des sites d'intenses activités et occupations humaines. De nombreuses études sont menées depuis quelques années sur l'architecture et la nature sédimentaire du remplissage de lagunes en Méditerranée afin de décrypter quels sont les facteurs qui ont contrôlé leur évolution au cours des derniers siècles et millénaires, et quels impacts précis ces facteurs ont exercé. Les lagunes offrent de plus l'avantage de préserver des archives souvent beaucoup plus complètes que celles qui caractérisent les milieux littoraux plus ouverts, et constituent par conséquent des cibles adaptées pour comprendre comment certains forçages contrôlent la morphodynamique littorale. C'est dans ce contexte scientifique qu'une étude sismique très haute résolution a été menée dans la lagune de Mar Menor (Province de Murcie, SE Espagne), la plus grande lagune de Méditerranée, après la lagune de Venise. D'une superficie de l'ordre 150 km<sup>2</sup>, la lagune de Mar Menor se distingue par une longue (23 km) et étroite (150-300 m) barrière (ou lido, appelé localement la Manga) presque entièrement urbanisée. Sa profondeur moyenne n'excède pas 4 m. Le substrat géologique de la lagune est constitué de marnes, conglomérats et gypses d'âge Mio- Pliocène. Les données sismiques acquises couplées à une carotte sédimentaire datée (Dezileau et al., 2016) révèlent que le remplissage lagunaire récent (Holocène) n'excède probablement pas 4-5 m. Par ailleurs deux géométries bien distinctes caractérisent le remplissage. Du côté de la barrière, les réflecteurs de forme sigmoïde et pentés vers le centre de la lagune dessinent des lobes de débordement (washovers). Ces réflecteurs passent à des surfaces d'érosion horizontales en direction du centre de la lagune, surfaces qui sont associées à des niveaux sableux dans la carotte, interprétés comme des niveaux de tempêtes. Le centre de la lagune est occupé par un remplissage régulier plan. A l'opposé du Lido, côté bassin versant, les réflecteurs montrent une configuration progradante avec un pendage vers le centre de la lagune. Ces géométries reflètent clairement une alimentation par les bassins versants, aux débouchés des rivières. Les datations indiquent que les washovers et les niveaux sableux associés se mettent en place pendant des périodes de tempêtes accrues, connues en Méditerranée, coïncidant avec les périodes les plus froides de l'Holocène après 6000 B.P. Les cônes deltaïques qui constituent le remplissage du côté continental se mettent en place quant à eux à partir de 2000 B.P., ce qui correspond au début des exploitations minières et métallurgiques massives romaines du bassin versant de Carthagène.

**Mots-Clés:** Lagune, holocène, remplissage, sismique, tempêtes, mines

\*Intervenant

## Assessment of the potential for future deposition in the tidal flats of the northern coast of Vietnam

Si Son Tong , Jean-Paul Deroin <sup>\*1</sup>, Vincent Barbin <sup>ψ</sup>, Thi Lan Pham

<sup>1</sup> Université de Reims Champagne-Ardenne (URCA) - Groupe d'Etude sur les Géomatériaux et Environnements Naturels, Anthropiques et Archéologiques - EA 3795 – GEGENAA, Centre de Recherche en Environnement et Agronomie 2 esplanade Roland Garros 51100 Reims, France

Tidal flats represent specific environment suffering tidal regime with submersion during flood tide and exposure during ebb tide. Tidal flats of the north coast of Vietnam (Red River estuary) are shaped in diurnal tide condition, with tide ranges varying from 0.3m to 3.5m. Along 350 km of coastline, tidal flats are changing by erosion and deposition at different rate and direction. This study applies remote sensing techniques and GIS tools to solve two main scientific issues: the quantitative variation of the tidal flats over years 1989, 2000, and 2014, and the assessment of future deposition of tidal flats based on the characteristics of forcing factors.

The waterline method has been applied to build Digital Elevation Models (DEMs) of tidal flats during the last 25 years. 117 Landsat images acquired with TM, ETM+ and OLI (Landsat 4, 5, 7 or 8) have been processed to build tidal flats DEMs in 1989, 2000, and 2014. The vertical accuracy is of 0.144 m. Tidal flats in the study area are zoned by elevation into high tidal flat (1.92 m to 2.96 m), middle tidal flat (0.89 m-1.92 m), and low tidal flat (0.30 m-0.89 m). The area with the elevation greater than 2.96 m is the supratidal zone. High tidal flats have lost 11.9x103 ha from 1989 to 2014 due to growing mangrove projects and development of infrastructures. The gradual degradation of mid tidal flats from 38.6x103 ha in 1989 to 35.9x103 ha in 2014 proves the erosion. The erosion of the tidal flats along the northern coast of Vietnam is particularly developed in the area extending from Yen Hung to Mong Cai, especially in Mong Cai with an amount of about 50.106 m<sup>3</sup> of sediments lost between 1989 and 2014. In the contrary, the tidal flats in the south of the study area show a high rate of deposition due to the sediments feeding by Red and Thai Binh rivers. About 35.106 m<sup>3</sup> of sediments deposited in the tidal flats surrounding the Red River mouth between 1989 and 2014. The forcing factors with highest agreement to the historical deposition are selected to create the potential for future deposition map with four levels of possibility of deposition. High potential for future deposition occupies 34% of tidal flat area, which concentrates on the regions around Red and Thai Binh river mouths, and Kim Son area. The smallest area (11%) belongs to low potential distributed in Cam Pha and Van Don, because the tidal flats are formed in rocky coast and insufficient sediment supply from rivers. The permanently eroded areas have no potential for future deposition in Hai Hau and some parts in Mong Cai. The spatial analysis technique is successfully applied to assess the potential for future deposition of tidal flats. Potential deposition in this study is suitable for future 50 years in context of climate change because sea level rise in the study area is 0.3 cm/year, exceeds the accuracy of DEM after 50 years. However, it is difficult to integrate the extreme phenomena such as storm, cyclones in the model.

**Mots-Clés:** Tidal flat, Deposition, Spatial analysis, Waterlines

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: [jean-paul.deroin@univ-reims.fr](mailto:jean-paul.deroin@univ-reims.fr)

## Les grandes dunes hydrauliques, un gisement de sable pour recharger les plages en érosion

Alain Trentesaux <sup>\*1</sup>, Robin Sigwald <sup>2</sup>, Guillaume Ghesquière <sup>2</sup>, Arnaud Héquette <sup>3</sup>, Adrien Cartier <sup>4</sup>,  
Adrien Crapoulet <sup>5</sup>, Cyril Congy <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Université de Lille - Laboratoire d'Océanologie et Géosciences - Univ-Lille/CNRS/ULCO (UMR 8187 LOG) -

<sup>2</sup> Artelia Eau Environnement - 6 rue de Lorraine, 38 130 Echirolles – Artelia Eau – France

<sup>3</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – Université Lille I - Sciences et technologies, CNRS : UMR8187, Université du Littoral Côte d'Opale - 28 av Foch 62930 Wimereux, France

<sup>4</sup> Géodunes - 19, rue Maurice Ravel - 59 240 Rosendaël – Géodunes – France

<sup>5</sup> Communauté d'Agglomération des Deux Baies en Montreuillois - 62170 Montreuil-sur-Mer – CA2BM – France

Au contraire de l'essentiel des côtes françaises, la façade la plus septentrionale n'est concernée par des problèmes de recul du trait de côte que sur 40% de son linéaire. Cependant quelques points de crispation sont notés, en particulier dans des sites fortement anthropisés. C'est le cas de la plage de Merlimont (62) située sur la façade Manche de la Côte d'Opale qui présente une érosion chronique d'environ -4300 m<sup>3</sup>/an depuis 2011, malgré la mise en place d'aménagements de défense contre l'érosion (système de drainage Ecoplage, recharge par beachscraping, installation de ganivelles). Dans ce contexte, la Communauté d'Agglomération des 2 Baies en Montreuillois a souhaité obtenir une maîtrise d'œuvre pour la requalification de la digue promenade de Merlimont. La question d'un rechargement massif se pose pour compenser les départs de sable et protéger la future digue. Les petits fonds des Hauts-de-France sont caractérisés par la présence en nombre de corps sédimentaires de très grande taille, les bancs sableux. Leur volume est considérable, mais la nature du sédiment semble plus variable tandis que la profondeur de leur crête peut participer à l'amortissement des houles venant du large. D'autres structures de tailles intermédiaires (grandes et très grandes dunes hydrauliques) peuvent servir de stock potentiel au recharge. Nous verrons avec cet exemple quelles connaissances il faut acquérir au préalable sur le terrain pour définir au mieux le site de prélèvement. Les données recueillies en mer (bathymétrie multifaisceaux et imagerie) montrent que le chenal séparant le premier banc de la plage est recouvert de très grandes dunes (hauteurs atteignant 6 m) orientées vers le nord, dans le sens du transit résiduel régional, elle-même recouvertes de plus petites dunes orientées vers le NE. Des prélèvements de sédiment superficiel indiquent que la zone est recouverte de sables moyens, certains étant compatibles avec un recharge de la plage.

**Mots-Clés:** trait de côte, érosion, recharge, plage, petits fonds, dunes sous, marines

<sup>\*</sup>Intervenant

## Processus sédimentaires et de piégeage des argiles au sein de dépôts sableux dans l'estuaire de la Gironde.

Maxime Virolle <sup>\*1</sup>, Benjamin Brigaud <sup>1</sup>, Hugues Feniès <sup>2</sup>, Raphaël Bourillot <sup>3</sup>, Eric Portier <sup>4</sup>,  
Patricia Patrier <sup>5</sup>, Daniel Beaufort <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Paris Sud (GEOPS) – Université Paris-Sud - Paris 11, CNRS : UMR8148 –ORSAY Cedex, France

<sup>2</sup> ENSEGID, Géoressources et Environnement – Bordeaux INP – 1 Allée Daguin, 33607 Pessac, France, France

<sup>3</sup> GORESSOURCES ET ENVIRONNEMENT – Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3 : EA4592, université Bordeaux Montaigne – Institut EGID 3 1, allée Daguin F-33607 Pessac cedex, France

<sup>4</sup> GDF-Suez, Direction EP – GDF-Suez – 1 place Samuel de Champlain, 92930 Paris la Défense Cedex, France

<sup>5</sup> Université de Poitiers – CNRS : UMR7285– France

L'estuaire de la Gironde, situé dans le Sud-Ouest de la France, est un estuaire macrotidal riche en argile et dominé par la marée. L'estuaire se situe à la confluence de la Dordogne et de la Garonne, sources des sédiments, et notamment des particules fines (< 2 µm) comme les minéraux argileux. Ces particules fines transportées en suspension dans l'estuaire contribuent à la formation du bouchon vaseux (concentration de quelques g.l en surface et jusqu'à plusieurs centaines de g.l sur le fond de l'estuaire formant la crème de vase) dont la position varie de manière saisonnière sous l'influence du débit fluvial (étiage-crue).

Des campagnes de terrains ont été réalisées sur 9 barres sableuses réparties sur un transect de 150 km. Une analyse faciologique a permis de déterminer les différents faciès mis en place à la surface des barres sableuses. Les résultats montrent l'influence de l'hydrodynamisme et de ses variations saisonnières sur les dépôts dans la zone intertidale des barres. Des analyses minéralogiques et pétrographiques sur des échantillons ont montré que des argiles (smectite, illite, kaolinite et chlorite) pouvaient se mettre en place en périphérie des grains détritiques pour former des " coatings argileux détritiques ". La présence de ces coatings au sein des dunes intertidales soulève la question du piégeage des argiles dans les dépôts sableux. Le défi est de comprendre leur piégeage et leur dépôt simultané avec les grains de sables dans un environnement à fort hydrodynamisme. Une des hypothèses concerne le rôle des diatomées. Ces dernières produisent des substances polymériques extracellulaires qui peuvent servir de colle pour accoler les argiles aux grains de sables.

Des carottages ont permis d'étudier l'association verticale de faciès constituant certaines barres. Les analyses faciologiques témoignent de l'influence de l'hydrodynamisme, notamment du bouchon vaseux et de la crème de vase, sur la mise en place des différents faciès. Des datations au carbone 14 montrent que la formation des barres sableuses dans l'estuaire est récente et qu'elles se sont déposées au cours des cent dernières années.

Plus généralement, l'ensemble des résultats permettra (1) d'améliorer notre compréhension sur le dépôt d'argiles dans les séries sableuses estuarienne, (2) de mieux comprendre la relation entre architecture interne des barres sableuses et hydrodynamisme et (3) de mieux contraindre le timing de mise en place de ces barres au sein de l'estuaire de la Gironde.

**Mots-Clés:** Gironde, Turbidité, Argiles, Hydrodynamisme, Datations

\*Intervenant

## Modalities of transfer and storage of sediment along the continental shelf of the Gulf of Gabes during the upper Pleistocene. Contribution of very high-resolution seismic data

Raouïa Zahmoul <sup>\*1</sup>, Alain Trentesaux <sup>\*2</sup>, Jean-Yves Reynaud <sup>\*2</sup>, Mohamed Hedi Inouibli <sup>1</sup>,  
César Witt <sup>2</sup>, Mohamed Ouaja <sup>3</sup>, Adnen Amiri <sup>1</sup>, Moez Mansoura <sup>4</sup>, Oussama Abidi <sup>1</sup>, Amira Essid <sup>5</sup>,  
Faten Hallek <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Unité de la Géophysique Appliquée aux Matériaux et aux Minéraux (URGAMM) - Tunisie

<sup>2</sup> Laboratoire d'Océanologie et des Géosciences (LOG) - Université de Lille, CNRS - France

<sup>3</sup> Faculté des Sciences de Gabès (FSG) - Tunisie

<sup>4</sup> Office National des Mines (ONM) - Tunisie

<sup>5</sup> Université de Gabès - Tunisie

The Gulf of Gabes in Southern Tunisia corresponds to the last large carbonate Mediterranean platform. It is also characterized by the highest Mediterranean tidal range ( $> 2\text{m}$ ). Due to changes in position of the coastline during the Quaternary oscillating climate and the probable effects of recent tectonic manifestations of the Jeffara, the surface of exposed shelf varied considerably. This has deeply influenced the onshore hydrologic system and the supply of detrital sediment to the offshore zone. The stratigraphy of continental Quaternary is currently revised thanks to new interpretation of key outcrops. It corresponds to a series of nested terraces linking the upstream part of the wadis with the coast. We want to present the first results from a very high-resolution seismic survey conducted in May 2018 in the Gulf of Gabes. This makes it possible establishing, for the first time, a land-sea physical link. The seismic profiles put to the fore a series made of at least four erosive sequences that can be followed along all or most of the study area. The mapping allows associating these sequences to the terrestrial drainage pattern whose connection with the coastal Pleistocene stratigraphy is discussed.

**Mots-Clés:** Climate change, Quaternary, seismic data, Gulf of Gabes

<sup>\*</sup>Intervenant

## **1.5. Cycles sédimentaires et cycles tectoniques // Les figures d'expulsion, marqueurs et traceurs des circulations de fluides en subsurface dans les bassins sédimentaires**

## Reconstitution des paléoenvirons de dépôt de la plate forme néritique aptienne cénomanienne cas de Djebel Debbagh (Nord-est Algérien)

Meriem Abdelmadjid <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> Université Badji Mokhtar - Annaba (UBMA) - BP 12, 23000, Annaba, Algérie

La reconstitution des paléoenvirons de dépôt de la plate-forme néritique du massif de Debbagh au Nord-est Algérien s'est basée sur l'étude sédimentologique détaillée des échantillons, provenant d'une coupe localisée au sein des formations calcaires de l'Aptien et du Cénomanien. L'interprétation pétrographique a livré une diversité de microfaciès appartenant à des paléoenvirons classés à la fin du plus distal au plus proximal dans un modèle de dépôt. Les formations néritiques montrent des paléoenvirons qui se résument en une plate forme carbonatée moyennement profonde à hydrodynamisme calme à modéré.

**Mots-Clés:** Étude sédimentologique., formations carbonatées., Nord, est Algérien., Paléoenviron nements

\*Intervenant

## Surface geomorphology of Azerbaijan mud volcanoes : an insight into their buildup processes

Victoria Bichaud <sup>\*ψ1</sup>, Patrice Imbert <sup>\*</sup>2, François Odonne <sup>1</sup>, Matthieu Dupuis <sup>3</sup>, Maelys Pain <sup>4</sup>,  
 Gulce Dinc <sup>5</sup>, Orhan Abbasov <sup>6</sup>, Frederic Donze <sup>7</sup>, Arthur Blouin <sup>5,8</sup>, Elnur Baloglanov <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – Université Paul Sabatier - Toulouse 3, CNRS : UMR5563 – France

<sup>2</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) Avenue Larribau 64018 Pau Cedex, France

<sup>3</sup> UMR 8217 CNRS - Université Lille 1 – Universitelle 1 – 59655 Villeneuve d'Ascq cedex, France

<sup>4</sup> Géosciences Rennes (GR) – Centre National de la Recherche Scientifique : UMR6118 – France

<sup>5</sup> Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs, UMR5150, CNRS,:- France

<sup>6</sup> Geological Institute of Azerbaijan (GIA) – Azerbaïdjan

<sup>7</sup> Laboratoire sols, solides, structures - risques – Université Grenoble Alpes, CNRS : UMR5521, France

<sup>8</sup> Unité de recherche Géosciences Marines (Ifremer) (GM) – Ifremer - BP 70 29280 Plouzané, France

We investigated the morphology of eight mud volcanoes of Azerbaijan using a combination of satellite photographs, high-resolution pictures acquired using a drone and the corresponding digital Earth models, and structural analysis of their surface deformation. The most important factors controlling the mode of growth and the resulting geometry appear to be the topography in which individual mud flows are emplaced and the rheology of the emitted mud.

On a flat area, the mud emitted during one eruption generally flows radially around the emission point, making an individual pie whose diameter can reach several hundred meters. We have observed in May this year pies resulting from several eruptions recorded in the past few years, the most recent erupted 6 weeks prior to our visit. With water-poor, high-viscosity muds, pies typically show a steep edge and have some relief (up to a couple of meters) above the surrounding landscape, while water-rich, low-viscosity muds just onlap onto the preexisting topography.

On conical mud volcanoes, when the volume of the erupted mass exceeds what can be accommodated by the summit caldera, the overspill typically flows radially away from the emission point. Low viscosity muds commonly bypass the cone to make flat lobes at the foot, which may cover several square km and extend as far as 8 km away from the crater. High-viscosity muds make glacier-like flows that creep downhill at low velocity and may freeze on steep slopes, contributing to the buildup of the cone. One extreme case of very high viscosity mud is the Kotyrdag mud volcano, which emits stiff mud at a rate of a few cm/day, and whose active mudflow has been creeping downhill for several decades.

Depending on their activity, in particular on the volume of individual flows, each volcano may show a combination of rather small pies infilling the caldera or a plateau-like top (small flows, shorter recurrence time) and long flows that extend all the way downslope and into the surrounding plain or valleys (large flows, longer recurrence time).

One additional process is related to the time interval between successive emissions on a flat surface: if the first flow has not dried out completely when the next one is emplaced, it may be squashed and compressed by the latter, leading to the development of a variety of compressional structures, mode 1 fractures, faults and folds in particular, indicative of the development of the volcano especially in a horizontal direction.

**Mots-Clés:** mud volcano, emplacement process

<sup>\*</sup>Intervenant / <sup>ψ</sup>Auteur correspondant: victoria.bichaud@gmail.com

## Pressions de pore et fonctionnement des systèmes pétroliers

Jean-Jacques Biteau \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE) – Pays-Bas

This talk aims at exploring the links between Pore pressures and Petroleum geology. Pressure, seals and traps are some of the basic components for the Petroleum System to work efficiently. The compaction of sediments is related to fluid expulsion mainly water but also hydrocarbons, i.e oil, gas, and mineral dispersed or concentrated in solutions. Pressure is defined as the ratio between a force and an area. Analyses of pressure through tests whatever they are remain fundamental for the petroleum geologists and the reservoir engineers. Pressure is considered normal when hydrostatic and abnormal when overpressure is developed in undrained systems.  $P_w$  is the aquifer pressure,  $P_{hc}$  is the pressure related to the buoyancy,  $P_n$  is the normal hydrostatic pressure. OVP is the overpressure, ie.  $P_w - P_n$ . Sealing intervals for hydrocarbons are related to impermeable rocks and ruled mainly by two processes: capacity and integrity. The capacity of a seal is linked to its entry pressure and wettability, the more this one the more the hydrocarbon column. The integrity of a seal is related to its resistance to hydraulic fracturing, the closest the pressure to the minimum stress  $S_3$  the weakest is the sealing and the hydrocarbon column.

**Mots-Clés:** Pressions, réservoir, couvertures, colonne d'hydrocarbures

\*Intervenant

## Paragenèses des seep carbonates: enregistreurs des mécanismes de migration sur faille

Jean Philippe Blouet <sup>\*1</sup>, Patrice Imbert <sup>\* $\psi$ 2</sup>, Sutieng Ho <sup>$\varphi$ 3</sup>

<sup>1</sup> Université de Fribourg - Suisse

<sup>2</sup> Total - France

<sup>3</sup> National Taiwan University - Taïwan

Les *seep carbonates* résultent de la migration d'hydrocarbures jusqu'au fond marin. Ils précipitent lors de la réaction d'oxydation des hydrocarbures couplée à la réduction des sulfates contenus dans l'eau de mer. Ce sont les indicateurs les plus évidents dans le registre fossile du discret phénomène de suintement des hydrocarbures ; on peut donc se demander dans quelle mesure l'étude de seep carbonates pourrait permettre d'identifier et de caractériser l'activité des systèmes pétroliers qui leur ont donné naissance.

Nous allons comparer les paragenèses de nombreux affleurements de seep carbonates d'âges et de localisation variés à travers le monde (Californie, Espagne, France, Taiwan). Toutes présentent des caractéristiques pétrographiques et géochimiques remarquablement semblables, i.e. une succession distinctive de cements qui peut se répéter de nombreuses fois. Ces observations sont interprétées comme de résultat d'un mécanisme commun de libération épisodiques d'hydrocarbures.

Le contexte géologique propre à chaque affleurement permet de proposer des failles ou des fractures hydrauliques sont comme chemin de migration dans chacun des affleurements étudiés.

Les seep carbonates apparaissent donc comme des enregistreurs des modalités de migration des hydrocarbures via des failles, lesquelles apparaissent variable à une échelle temporelle qui sera discutée.

**Mots-Clés:** seep carbonates, hydrocarbures, migration, paragenese

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>$\psi$</sup> Auteur correspondant: patrice.imbert@total.com

<sup>$\varphi$</sup> Auteur correspondant: Sutieng.Ho@gmail.com

## Processus gravitaires et paléosismologie dans les bassins de la marge ouest haïtienne

Mickael Charpentier <sup>\*ψ1</sup>, Sébastien Zaragozi <sup>φ1</sup>, Emmanuelle Ducassou <sup>§ 1</sup>, Priscilla Leclerc <sup>2</sup>,  
Nadine Ellouz-Zimmermann <sup>3</sup>

<sup>1</sup> UMR CNRS 5805 EPOC (Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux) (EPOC) - Université de Bordeaux (Bordeaux, France) - France

<sup>2</sup> Centre de formation et de recherche sur l'environnement marin (CEFREM) - CNRS : UMR5110, Université de Perignan Via Domitia - 52 Av Paul Alduy, 66860 Perpignan Cedex, France

<sup>3</sup> IFP - Geology-Geochemistry-Geophysics Avenue Bois-Préau 92500 Rueil-Malmaison, France

Les techniques d'enregistrements sismiques actuelles ne permettent pas de déterminer la probabilité des événements sismiques futurs ni même d'estimer leur temps de récurrence. Les enregistrements sédimentaires marins peuvent cependant offrir l'opportunité de pouvoir déterminer une récurrence des événements gravitaires potentiellement liés à des séismes grâce à la paléosismologie.

Les bassins de Jérémie et du Canal du Sud se situent sur la marge ouest d'Haïti, dans un contexte géodynamique actif, entre les failles Septentrional-Oriente et Enriquillo-Plantain-Garden. Ils ont été étudiés pour la première fois de façon intégrée avec des données bathymétriques, sismiques très haute résolution et des carottes sédimentaires collectées lors de la mission Haïti-Sis (2012). Une analyse sédimentologique détaillée a été menée sur les carottes avec des mesures XRF, granulométriques, rX ainsi que des observations microscopiques. La stratigraphie des carottes a été établie grâce à de la biostratigraphie basée sur les foraminifères planctoniques et des âges 14C. Les principaux résultats montrent que la sédimentation dans les bassins de Jérémie et du Canal du Sud à l'Holocène est constituée de séquences turbiditiques avec de grandes quantités de sédiment terrigène provenant du continent situé à quelques dizaines de kilomètres des bassins. Malgré des temps de récurrences assez similaires (~800 ans pour le bassin de Jérémie et ~1000 ans pour celui du Canal du Sud), les taux de sédimentation très différents pourraient s'expliquer par la position et la morphologie du bassin Jérémie, celui-ci étant plus favorable à l'accumulation de sédiment terrigène et aux déstabilisations des pentes. Cette étude a permis de conclure que les bassins de Jérémie et du Canal du Sud ainsi que ceux de Navassa et de Matley au sud possédaient des fonctionnements différents avec des temps de récurrence allant de ~800 à 5800 ans. Le bassin du Vent, au nord, est le bassin le plus actif avec ~160 ans entre chaque dépôt turbiditaire (homogénite). Le point commun à tous les bassins est cependant l'absence de système turbiditaire, ce qui pourrait être dû à une récurrence trop faible des événements turbiditiques ou plus probablement à un taux de subsidence trop élevé pour permettre leur développement de façon pérenne.

**Mots-Clés:** Haïti, paléosismologie, turbidites, homogénite

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: mickaelcharp@gmail.com

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: sebastien.zaragozi@u-bordeaux.fr

<sup>§</sup>Auteur correspondant: emmanuelle.ducassou@u-bordeaux.fr

## Seismic characterization of the relationship between fluid leakage indicators and structural control: Implications for hydrocarbon seal integrity

Antoine Chesne <sup>\*ψ1</sup>, Wibberley Christopher <sup>1</sup>, Patrice Imbert <sup>1</sup>

<sup>1</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – France

In order to better constrain the mechanisms of upward leakage from hydrocarbon accumulations, we studied the spatial and temporal relationships between fluid leakage indicators (pockmarks in particular), hydrocarbon reservoirs at depth and faults affecting them in the Oligocene to recent section of the Lower Congo Basin, offshore Angola. The study area covers two hydrocarbon fields, one in Oligocene reservoirs and gently faulted, while the other is hosted in strongly faulted Miocene sands. Major faults in the study area result from salt tectonics and are rooted in the Aptian-Albian salt or its evacuation weld; most of them have their activity postdated by deposition of a 100-m-thick Messinian mass-transport deposit and overlying lower Pliocene interval of low-seismic amplitude hemipelagites. A few of these deep-rooted faults however reach the mid-Pliocene to recent interval. This 500-m-thick unit is affected in its lower part by a 300 to 400-m-thick polygonal fault system (Cartwright and Lonergan, 1996), unrelated to local tectonics. Pockmarks are developed in the whole interval affected by polygonal faulting and above, up to the present-day seabed. They typically stack into 100 to 200-m high columns marked by bright seismic amplitudes, suggesting a combination of presence of gas (negative amplitudes) and methane-derived carbonates (positive amplitudes). Spatially, they are clustered above the culminations of the underlying hydrocarbon-bearing structures, strongly suggesting that they play the role of safety valves for the accumulations. In more detail, pockmarks can be seen to preferentially develop where the upward termination of a tectonic fault of the deeper family intersects the roots of the faults of the polygonal system. Pockmarks are then systematically developed in the hanging wall of the related polygonal fault. The density of pockmarks is higher above the more faulted reservoir. These observations indicate that faults, even inactive at present, remain major fluid conduits for hydrocarbon migration and leakage to the seabed.

Cartwright, J. A., & Lonergan, L. (1996). Volumetric contraction during the compaction of mudrocks: a mechanism for the development of regional-scale polygonal fault systems. *Basin Research*, 8(2), 183-193.

**Mots-Clés:** fault, polygonal fault, hydrocarbon migration

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: antoinechesne22@gmail.com

## Fonctionnement sédimentaire d'un complexe chenal-levées-lobe sur une pente carbonatée moderne (Great Bahama Bank)

Emmanuelle Ducassou <sup>\*1</sup>, Thierry Mulder <sup>1</sup>, Joanna Lapuyade <sup>1</sup>, Mélanie Principaud <sup>1</sup>,  
Ludivine Chabaud <sup>1</sup>, Gilles Conesa <sup>2</sup>, Vincent Hanquiez <sup>1</sup>

<sup>1</sup> UMR 5805 Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (EPOC) – Université Sciences et Technologies - Bordeaux I – France

<sup>2</sup> Aix-Marseille Univ, CNRS, IRD, INRA, Coll France, CEREGE Aix-en-Provence (AMU) – Aix-Marseille Université - AMU – France

Les données de sismique très haute résolution de la mission CARAMBAR (2010) ont permis de décrire pour la première fois un ensemble de systèmes gravitaires complexes de type chenal-levée sur une pente carbonatée moderne. Ces systèmes, qui se succèdent stratigraphiquement et indiquent une migration du chenal, se situent sur la pente ouest de *Great Bahama Bank* (GBB) et sont actuellement inactifs.

L'unique lobe identifié sur la pente du GBB se caractérise par une forme ovoïde allongée typique et un écho-faciès transparent. Son extension ( $\geq 15$  km), son épaisseur ( $\leq 10$  m) et le relief topographique résultant par rapport au fond marin environnant ( $< 5$  m) sont très similaires aux analogues connus en domaine silicoclastique alors que le système chenal-levées a une taille inférieure aux systèmes silicoclastiques classiques. En amont de ce complexe chenal-levées-lobe, entre  $\sim 400$  et  $600$  m de profondeur d'eau, une large zone entaillée par des ravines de faible profondeur pourrait alimenter ce système gravitaire, sans qu'aucun lien physique clair n'ait pu être établi.

Une étude sédimentologique et stratigraphique détaillée a été menée sur sept carottes sédimentaires situées dans le lobe, le remplissage du système chenal-levées le plus récent et les ravines. L'étude stratigraphique des carottes est basée sur les assemblages des foraminifères planctoniques et trois âges 14C. Les analyses sédimentologiques incluent une description détaillée des carottes, des mesures granulométriques et spectrocolorimétriques, de l'imagerie rX, des mesures XRF, et l'identification et le comptage des particules composant les différentes fractions du sédiment. Ce dernier point a constitué une étape importante dans la compréhension des processus sédimentaires impliqués dans la construction de ces corps sédimentaires et dans l'origine des particules. Les principaux résultats montrent que le lobe est drapé par  $\sim 50$  cm de dépôts de texture wackestone d'âge holocène et de la dernière période glaciaire. Le lobe en lui-même est constitué de dépôts wackestone incluant des nodules partiellement lithifiés. Ces sédiments, lithifiés ou non, datent du stade isotopique 5 (MIS 5,  $> 80$  ka). La composition des sédiments ne montre pas de réelle différence entre les dépôts holocènes et les dépôts sous-jacents du lobe du MIS 5, révélant une origine commune des sédiments produits en période interglaciaire (boue aragonitique du banc mélangée à une fraction pélagique). Les processus gravitaires à l'origine du complexe chenal-levées-lobe sont donc très probablement confinés à la pente et n'ont pas de lien direct avec la bordure de la plate-forme carbonatée mais plutôt avec la zone d'accumulation sédimentaire présente en haut de pente et alimentée en période interglaciaire par les ravines.

**Mots-Clés:** système chenal, levée, lobe, processus gravitaires, pente carbonatée, Bahamas, Holocène/Pléistocène

\*Intervenant

## Glissements sous-marins sur la pente d'Exuma Sound (Bahamas).

Natacha Fabregas <sup>\*1</sup>, Thierry Mulder <sup>1</sup>, Hervé Gillet <sup>1</sup>, Audrey Recouvreur <sup>1</sup>, Jean Busson <sup>1,2,3</sup>,  
Vincent Hanquiez <sup>1</sup>, Jean Borgomano <sup>4</sup>

<sup>1</sup> UMR 5805 Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (EPOC) – Université de Bordeaux  
(Bordeaux, France) – France

<sup>2</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – 64018 Pau, France

<sup>3</sup> IFP Energies Nouvelles (IFPEN) – IFP Energies Nouvelles, 92852 Rueil-Malmaison Cedex, France

<sup>4</sup> CEREGE – CNRS : UMR7330 – France

Les glissements gravitaires sont des processus de rupture et de transfert de sédiments. Ils peuvent avoir lieu en domaine océanique ou continental. Les plates-formes carbonatées actuelles sont rares et les Bahamas contiennent les plus grandes plate-formes isolées. Les mécanismes préconditionnants et déclencheurs des glissements sont encore systématiquement source de discussion. De nombreuses missions océanographiques ont ciblé les Bahamas, notamment les missions CARAMBAR (Université de Bordeaux). Les données de surface (bathymétrie, réflectivité acoustique et sismique THR) et les données de subsurface (sismique HR) ont permis d'étudier en détail les glissements situés dans le bassin intra plate-forme d'Exuma Sound. L'analyse conjointe des données de surface et des données sismiques montre que les sédiments sont évacués par des processus gravitaires, exclusivement des glissements translationnels, et que des hémipelagites comblient totalement ou partiellement les cicatrices des glissements. Les sédiments auraient alors transité par le canyon sous-marin d'Exuma. La cohésion non drainée a été estimée en appliquant la méthode de glissement plan sur une surface infinie. Nous avons utilisé la hauteur des escarpements actuels en partant de l'hypothèse d'un facteur de sécurité égal à 1. L'impact des séismes ou d'une surpression interstitielle ont également été envisagés. Les conditions actuelles ne semblent pas favorables au déclenchement d'un glissement. Les calculs ont cependant montré qu'une sollicitation telle que la surpression interstitielle, éventuellement liée à un séisme pourrait déclencher une instabilité. Le calage stratigraphique propagé sur le bloc sismique depuis les données de forage ODP est soumis à de nombreuses incertitudes mais il semblerait que la majorité des glissements proche de la surface aient eu lieu entre le Pliocène et le Pléistocène, ce qui corrobore les conclusions du Leg ODP 101. Il ne semble cependant pas exister de niveau de décollement commun à tous les glissements. Un modèle de dépôts a été proposé pour la bordure intérieure d'Exuma Sound. Il présente l'évolution du bassin depuis le Cénozoïque. Certains processus impliqués dans cette zone (comme la surpression et les séismes) pourraient également affecter la bordure nord du Little Bahama Bank.

**Mots-Clés:** glissements, Bahamas, carbonates, processus gravitaires

\*Intervenant

## Synthèse des processus de dépôt en contexte de pente carbonatée : Exemple de la pente nord du Petit Banc des Bahamas

Kelly Fauquembergue <sup>\*1</sup>, Emmanuelle Ducassou <sup>1</sup>, Thierry Mulder <sup>1</sup>, Ludivine Chabaud <sup>1</sup>,  
Elsa Tournadour <sup>1</sup>, Paul Moal-Darrigade <sup>1</sup>, Audrey Recouvreur <sup>1</sup>, Marie-Claire Perello <sup>1</sup>, Emmanuelle Poli  
<sup>2</sup>, Jean Borgomano <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (EPOC) - CNRS : UMR5805 - France

<sup>2</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) - TOTAL - 64018 Pau, France

<sup>3</sup> CEREGE - IRD : UMRD161, Aix Marseille Université U M 34, Collège de France : U M R7330

Les missions océanographiques Carambar (2010), Carambar 1.5 (2014) et Carambar 2 (2016- 2017) menées au large de la pente nord du Petit Banc des Bahamas (PBB) ont permis d'étudier les processus d'export sédimentaire quaternaires sur ce système carbonaté. Les 24 270 km<sup>2</sup> de données bathymétriques couplées aux 6398 km de lignes sismiques très haute-résolution et aux 42 carottes sédimentaires reparties entre - 177 m et - 4873 m de profondeur ont permis de caractériser ce système depuis la pente supérieure jusqu'à la plaine abyssale.

Le premier corps sédimentaire de la pente est le prisme de haut niveau marin. Actuellement, le prisme holocène s'étend au pied de l'escarpement de - 177 m à - 360 m. Les dépôts sédimentaires sont principalement engendrés par le density cascading qui alimente le prisme durant les fronts froids hivernaux ainsi que le passage d'ouragans.

La pente entre -300 m et -1000 m est entaillée de 18 canyons. La boue de péri-plate-forme est le principal constituant des dépôts récents à ces profondeurs. Au cours des derniers 350 ka, les exports sont conditionnés par les variations de productivité et d'enniolement sur la plate-forme. Les sédiments les plus grossiers (foraminifères et ptéropodes) se déposent durant les périodes glaciaires où les courants vannent les particules fines et favorisent la diagenèse. Sur la pente inférieure (- 1000 m à - 1300 m), les canyons débouchent sur une série de sillons distributaires connectés à des zones de dépôts restreintes. Les taux de sédimentation décroissent de la pente supérieure aux sillons, tandis que la diagenèse augmente.

Entre -1300 et -4800 m, la pente se caractérise par le canyon géant de Great Abaco. Celui-ci est alimenté par de multiples tributaires, provenant de ses marges sud et nord ainsi que de nombreuses déstabilisations. Les carottages effectués suggèrent un transit important à travers les tributaires venant du sud (pente bahamienne carbonatée) mais peu de dépôts carbonatés dans le lobe observé au débouché de ce canyon, probablement vannés et/ou dissous par les courants de fond (Antarctic Bottom Water). La particularité de ce canyon géant est son alimentation également par sa marge nord, actuellement caractérisée par des dépôts hémipelagiques contenant plus de 50% de particules terrigènes apportées par les courants marins pendant certaines périodes.

**Mots-Clés:** Carbonate slope, Bahamas, sedimentary process, meltawater pulses, canyon, deep currents

<sup>\*</sup>Intervenant

## Mise en place et évolution du prisme holocène de la pente Nord du Petit Banc des Bahamas

Kelly Fauquembergue <sup>\*1</sup>, Emmanuelle Ducassou <sup>1</sup>, Thierry Mulder <sup>1</sup>, Vincent Hanquiez <sup>1</sup>,  
Marie-Claire Perello <sup>1</sup>, Emmanuelle Poli <sup>2</sup>, Jean Borgomano <sup>3</sup>

1 Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (EPOC) - CNRS : UMR5805 - France

2 TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) - 64018 Pau, France

3 CEREGE - Institut de Recherche pour le Développement : UMRD161, Aix Marseille Université U M R7330

Cette étude traite de la dynamique sédimentaire qui s'opère entre la plate-forme carbonatée du Petit Banc des Bahamas (PBB) et la pente sous-jacente. Un prisme holocène s'est développé sur le rebord de pente du PBB (entre - 170 m à - 360 m de profondeur), au pied d'une série de terrasses et d'escarpements dont le plus profond se situe à -96 m de profondeur. L'épaisseur de ce prisme peut varier de 0 à 35 m d'épaisseur. Il repose sur un substratum datant du Pléistocène. La campagne Carambar 1.5 (2014) a permis de collecter plus de 150 km<sup>2</sup> de données bathymétriques, 1120 km de sismique très haute résolution et 12 carottes sédimentaires afin d'étudier la mise en place de ce prisme. L'analyse des contenus sédimentaires et les résultats des 19 datations radiocarbone obtenus sur ces carottes ont permis de retracer l'évolution des différents facteurs d'export sédimentaire qui ont alimenté ce dépôt depuis la plate-forme vers la pente durant l'Holocène. Actuellement, le prisme semble être alimenté principalement par des particules issues de la plate-forme puis transportées par le mécanisme de density cascading qui s'opère lors des fronts froids hivernaux. Des séquences sédimentaires potentiellement liées aux passages d'ouragans ont également été observées. L'absence d'ooïdes dans les sédiments de ce prisme, malgré leur abondance dans les passes tidales, démontre que les exports ne sont pas assez énergétiques pour transporter les grains grossiers, oolithes ou bioclastes, jusqu'à ces profondeurs.

La formation du prisme a débuté il y a  $13,6 \pm 3,5$  ka cal BP, après le Meltwater Pulse 1A. Cependant, l'enniolement de la plate-forme ne date que de 6 ka cal BP. Ce paradoxe est probablement lié à l'existence de périodes de stagnations entre les meltwater pulses. Ces périodes ont été marquées par la formation de terrasses qui correspondent alors à des environnements peu profonds et induisent une production carbonatée qui peut être exportée vers le prisme. Ces terrasses ont en outre été probablement abrasées lors de la reprise de la remontée du niveau marin, ce qui a augmenté l'export.

La principale phase de développement du prisme est datée à  $6.5 \pm 0.9$  ka cal BP, quand le niveau marin a finalement atteint le rebord de plate-forme. Depuis, les variations de quantité d'aiguilles d'aragonite retrouvées dans les carottes illustrent les variations fines du niveau marin, notamment avec une augmentation de la quantité d'aiguilles à 4 ka cal BP, lors de l'enniolement maximum de la plate-forme.

**Mots-Clés:** Carbonate System, Bahamas, Holocene, Meltwater pulses, density Cascading, hurricanes

<sup>\*</sup>Intervenant

## Pulsations tectoniques globales. Quelques exemples tirés des séries sédimentaires

Serge Ferry <sup>\*1</sup>, Danièle Grosheny <sup>1/2</sup>

<sup>1</sup> 6D avenue Général de Gaulle, 05100 Briançon, France – Université de Lyon – France

<sup>2</sup> Université de Lorraine – GeoRessources, UMR 7359 CNRS-UL – France

Le passage Cénomanien-Turonien (C-T) offre un bel exemple d'hétérogénéité séquentielle à très grande échelle qui ne peut s'expliquer que par des déformations tectoniques, principalement localisées dans et à la périphérie des domaines orogéniques (chaîne de Sevier en Amérique du Nord, Alpes franco-autrichiennes, arc syrien). Sur les plate-formes stables (ouest-Europe, craton nord saharien) il est possible de suivre au contraire une certaine homogénéité qui a peut-être contribué à la popularité encore solide de la notion d'eustasme au Mésozoïque. L'analyse séquentielle détaillée des séries sédimentaires au passage C-T permet de mettre en évidence deux phases de déformation qui encadrent la crise anoxique océanique et qui semblent être corrélées avec une recrudescence du magmatisme global, d'après les données magmatiques directes, d'une part, et géochimiques dans l'océan mondial, d'autre part. Des données similaires (mais pas identiques) sont constatées au passage Aptien-Albien et au passage Albien-Cénomanien. Elles accréditent l'idée que la tectonique globale ne serait pas un processus placide mais procèderait par crises, même si le mécanisme profond peut rester plutôt uniforme. Si ces données sédimentaires encore fragmentaires se confirmaient, elles poseraient l'épineuse question de ces mécanismes.

**Mots-Clés:** pulsation tectonique, CTBE, Crétacé

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>1/2</sup>Auteur correspondant: danièle.grosheny@univ-lorraine.fr

## Upward migration of gas in an active tectonic basin: the Sea of Marmara case study

Celine Grall <sup>\*1</sup>, Pierre Henry <sup>2</sup>, Stéphanie Dupré <sup>3</sup>, Louis Geli <sup>3</sup>, Carla Scalabrin <sup>3</sup>, A.m. Celal şengör <sup>4</sup>,  
Namik M Cagatay <sup>5</sup>, Gunay Cifci <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) – États-Unis

<sup>2</sup> CEREGE – Aix Marseille Université, CNRS : UMR7330 – France

<sup>3</sup> Ifremer (GM) – France

<sup>4</sup> ITU (Istanbul Technical University) – Turquie

<sup>5</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi (ITU) – Ayazağa Kampüsü İTÜ Rektörlüğü Binası, Maslak, Şişli, İstanbul, Turquie

<sup>6</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi (DEU) – Inciraltı-Izmir, Turquie

Gases of various sources were collected at the seafloor of the Marmara basin suggesting that the gases expelled have experienced multiple sequences of upward migration, from multiple sources. The pathways of upward migration of gas can be reconstructed by considering the distribution of gas seeps with respect to the near-surface geomorphostructure and the regional stratigraphic architecture of the Marmara Basin. Statistical analysis of the spatial relationship between gas seeps and active fault at the seafloor show that gas seeps appear to be more favorably localized within a 1-2 km swath around active faults where sediment permeability is probably enhanced by deformation. In the fault zones, fault intersections between sets of transtensive and transpressive subsidiary faults, or between subsidiary faults and main faults, are the preferred gas pathways. These subsidiary structures localize methane seeps, observed as elongated black patches with bacterial mats, gas bubble emission sites, and chemoherms associated with buried mud volcanoes. Gas seeps are, however, rare along active faults segments crossing basin depocenters but focus along basin edges and along topographic highs. Considering the role of sedimentary layers as gas migration pathways can explain this characteristic of the distribution of gas seeps. Fault zones that cross updip gas migration pathways will vent comparatively more gas than fault zones on the downdip side. Moreover, gas accumulation and resulting overpressuring along the western fault segment crossing the Western High may be associated with aseismic fault creep and intense gas emissions at the seafloor. In contrast, the poorly focussed seepage along the fault segment crossing the Central High may be linked to the locked state of this fault segment. This suggests that aseismic slip (and not only earthquake occurrence) effectively maintains high permeability conduits in fault zones in sediments.

**Mots-Clés:** cold seeps, gas emissions, damage zone, gas updip migration in basin

Intervenant

## Pétrographie, diagenèse et état de la fracturation des formations carbonatées éocènes (région de Tébessa, Algérie Nord orientale)

Saad Hireche <sup>\*1</sup>, Azzedine Bouzenoune <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Génie Géologique Université de Mohamed Seddik Benyahia - Jijel (LGG) – BP 98 Ouled Aissa Jijel 18000, Algérie

Les formations éocènes de la région de Tébessa au NE de l'Algérie, présentent de grands intérêts socio-économiques et scientifiques. Le but principal de notre étude est de déterminer l'évolution diagénétique des faciès carbonatés ayant comblé le bassin durant l'éocène, ainsi que les paléoenvironnements de dépôt et du contexte paléogéographique éocène de cette région, et de préciser l'endommagement (déformation, fracturation) subi par ces mêmes roches lors de l'évolution tectonique du bassin. Parmi les massifs éocène faisant l'objet de cette étude, le synclinal de Gourigueur où une caractérisation de l'état de fracturation des formations carbonatées a été réalisé. Le synclinal éocène de Gourigueur se trouve à environ 50 Km à l'Ouest de la ville de Tébessa.

Le synclinal éocène de Gourigueur se trouve au nord-est de l'Algérie à environ 50 Km à l'Ouest de la ville de Tébessa. L'Eocène carbonaté fracturé de ce massif constitue l'un des aquifères de la région. Le présent travail vise à caractériser l'état de la fracturation de ce réservoir aquifère à partir d'une analyse multiscalaire. De direction atlasique (NE-SW), le synclinal de Gourigueur s'étend sur une vingtaine de kilo- mètres du SW au NE et sur environ cinq kilomètres du NW au SE. La projection stéréographique des pôles des plans de stratification donne un axe du pli orienté N34 E et incliné de 4 SW. A son extrémité nord-orientale, il se termine par une fermeture péri-synclinale alors vers le SW il s'ennoie sous les formations quaternaires ; ces dernières constituent l'aquifère poreux superficiel le plus important de la région. Les mesures des directions prélevées dans les formations carbonatées éocènes ont permis de mettre en évidence deux familles de fractures principales (d1 et d2) dont les orientations moyennes sont respectivement N43E77NW et N132E81SW et deux familles de fractures secondaires (d3 et d4) de directions obliques par rapport aux deux premières respectivement ENE-WSW à ESE-WNW et SSE-NNW.

L'examen des images satellitaires a donné des résultats montrant une certaine correspondance avec ceux du terrain notamment en ce qui concerne les familles de fractures, leur orientation et leur densité, bien que la connectivité ait diminué. L'analyse microfaciologique des échantillons prélevés a permis de montrer que la porosité de ces roches carbonatées éocènes est essentiellement contrôlée par la porosité de fracture ; la porosité matricielle étant très faible voire nulle pour certains faciès.

**Mots-Clés:** Fracturation, Pétrographie, Diagnèse, Éocène

Intervenant

Auteur correspondant: saadhireche@yahoo.fr

## Insights into the permeability of polygonal faults from their intersection geometries with Linear Chimneys: a case study from the Lower Congo Basin

Sutieng Ho <sup>1,2</sup>, Jean-Philippe Blouet <sup>\*2</sup>, Daniel Carruthers <sup>3</sup>, Martin Hovland <sup>4</sup>, Partice Imbert <sup>\*5</sup>, Andreas Wetzel <sup>6</sup>

<sup>1</sup> National Taiwan University - Taïwan

<sup>2</sup> University of Fribourg, Department of Earth Sciences - Suisse

<sup>3</sup> Compagnie Générale de Géophysique - Royaume-Uni

<sup>4</sup> University of Bergen, Center of Geobiology - Norvège

<sup>5</sup> Total CSTJF - TOTAL S.A. - France

<sup>6</sup> University of Basel, Geological Institute - Suisse

Layer-bound arrays of polygonal compaction faults have long been considered as important migration routes for hydrocarbon fluids leaking to the surface across thick shale sequences. A classic example is the deep offshore of the Lower Congo Basin where numerous fluid leakage structures are present above a Pliocene polygonal fault system. In this paper we present a detailed seismic analysis of a newly recognised system of Quaternary-aged Linear Chimneys and their intersection geometries with pre-existing Pliocene-aged polygonal faults (PF). Most (73%) of the 209 chimneys analysed intersect the lower portions of polygonal faults and almost half of these are rooted in strata below the PF interval. This indicates that fluid (in this case gas) migrated vertically, cross-cutting polygonal faults as it ascended through the tier. This is a strong indicator that PFs did not provide viable migration pathways otherwise chimneys would terminate at the upper tip of the fault (Ho, 2013), which would be the most likely migration exit point; only twice did this occur in the whole study area. A sub-set of chimneys stems from or above PF planes but these are restricted to either the lower footwall or from the apex area of hanging wall. At best they are evidence of fluids migrating up the lower part of polygonal faults and exiting deep within the tier, then migrating through most of the tier in their own vertical leakage vents by creating vertical hydraulic fractures. These results provide strong indicators that at least within this part of the Lower Congo Basin polygonal faults were the least effective/favoured migration pathway and that it was more energy-efficient for migrating gas to hydrofracture its fine-grained overburden than to re-open polygonal faults.

**Mots-Clés:** Hydrocarbon, Chimney, Polygonal fault, fluid migration, hydrofracture

\*Intervenant

## Pockmarks above buried reservoirs: how structural heterogeneity in sediment cover governs gas leakage

Sutieng Ho <sup>\*ψ1,2</sup>, Jean-Philippe Blouet <sup>\*φ1</sup>, Partice Imbert <sup>\*3</sup>, Martin Hovland <sup>4</sup>, Andreas Wetzel <sup>5</sup>, Daniel Carruthers <sup>6</sup>

<sup>1</sup> University of Fribourg, Department of Earth Science - Suisse

<sup>2</sup> National Taiwan University - Taïwan

<sup>3</sup> Total CSTJF - TOTAL S.A. - France

<sup>4</sup> University of Bergen, Center of Geobiology - Norvège

<sup>5</sup> University of Basel, Geological Institute - Suisse

<sup>6</sup> Compagnie Générale de Géophysique - Royaume-Uni

Pockmark trails above buried turbidite channels have been described over the last decade. Past studies have focused on general plumbing systems on a rather regional scale, but precise migration routes from channel to sub-seabed have been rarely investigated. This study focus on the expression of hydrocarbon leakage at the individual sandbody scale on 3D seismic data. This study investigates and demonstrate the possibility of hydrocarbon using uncommon structures as migration pathways instead of employing well documented ones such as tectonic structures, faults/fractures or strata, by using two examples extracted from Ho (2013): 1) In a first example, a series of pockmarks develop within sediment waves filling a gully that occurs above a paleo channel. The tips of the pockmarks root at the lowest points of a sediment wavecomplex, i.e. at points of least overburden. The vertically stacked, erosional interfaces in the stoss side of wave progradations are believed to have guided migrating fluids up from the buried channel toward shallower intervals (Ho, 2013). Gas release via the stacked erosional interfaces appears to have been synchronous, and formed a pockmark trail that superposes with the string of wave troughs along the channel axis. 2) A second example shows a trail of pockmarks occurring above a gas-bearing channel levee complex. The conical infills of these pockmarks are capped by dome-shaped positive high-amplitude reflections. This cap actually cross-cuts stratification and is therefore interpreted as a diagenetic horizon, indicating carbonate cementation at the front of a sulphate-methane transition zone (Paull and Ussler III, 2008). These carbonate crusts mimic the concentric planform of pockmark infills. This observation indicates that after the pockmark formation, methane migration went on in a more subdued manner inside the whole pockmark infill, with preferential focusing through the axial part of the feature. As a result, the dome-shaped carbonate form above the pockmark, and a series of carbonate covers line up above the pockmark trail to form another upper trail following the trend of buried levees. These observations indicate that the initial craters of pockmarks occur above gas accumulations which are structurally controlled by underlying sedimentary features. In conclusion, the position and architecture of sub-surface sedimentary structures has a crucial impact on determining fluid migration pathways and nucleation locations of subsequent leakage structures.

**Mots-Clés:** Pockmark, Hydrocarbon, Authigenic carbonate, Methane gas migration, Angola

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>#</sup>Auteur correspondant: Sutieng.Ho@gmail.com

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: jeanphilippe.blouet@gmail.com

## The Ayaz-Akhtarma mud volcano, onshore Azerbaijan: edification processes revealed by geomorphology and structural analysis

Patrice Imbert <sup>\*1</sup>, Fran<sup>c</sup>ois Odonne <sup>2</sup>, Maelys Pain <sup>3</sup>, Victoria Bichaud <sup>\*2</sup>, Matthieu Dupuis <sup>4</sup>, Remy Juste  
 , Frederic Donze <sup>5</sup>, Orhan Abbasov <sup>6</sup>, Elnur Baloglanov <sup>6</sup>

<sup>1</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – Pau Cedex, France

<sup>2</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) -- Toulouse III, CNRS: UMR5563 -France

<sup>3</sup> Géosciences Rennes (GR) – Centre National de la Recherche Scientifique : UMR6118 - France

<sup>4</sup> UMR 8217 CNRS - Université Lille 1 -- 59655 Villeneuve d'Ascq cedex, France

<sup>5</sup> Laboratoire sols, solides, structures - risques – Université Grenoble Alpes, CNRS : UMR5521, France

<sup>6</sup> Geological Institute of Azerbaijan (GIA) – Azerbaïdjan

The Ayaz-Akhtarma mud volcano (AAMV), onshore Azerbaijan, is composed of an elliptical central plateau, 3 km by 2 km, whose relief roughness does not exceed 5 m, and a peripheral apron that downlaps onto the surrounding gentle topography with a slope angle of 6° on average (PhD M. Dupuis, 2017). The comparison of satellite pictures acquired in 2004, 2011 and 2017 indicates that the central plateau on a 10-year scale undergoes radial expansion, at rates that decrease radially from over 5 m/year in the central part to less than 1 m/year close to the edge. The deformation is dominated by concentric ridges interpreted as pop-up blocks in the outer part of the plateau where expansion is confined along the apron that is also affected by thrust faults. In the middle part, conjugate strike-slip faults indicate both radial compression and circumferential extension.

The 500-m diameter central part of the plateau, informally referred to as "the eye of Ayaz-Akhtarma", is the most active part of the volcano and we have been able to follow its evolution since 2014. In 2014, the eye showed m-wide, m-deep furrows roughly radiating from the center, albeit with a clear preferential N040 trend. A 20-m-diameter cluster of active gryphons was also present. Upon return to the field in May, 2016, most of the eye was covered by two adjacent mud pies, respectively 300 m and 80 m in diameter, with an overall smooth surface affected by desiccation cracks. The pies had covered most of the furrows and all the gryphons observed previously. The surface of the smaller pie turned out to consist of a 30-cm-thick crust resting atop a body of very soft mud; sounding indicated that the soft mud made a lens whose thickness regularly increased up to 3 m in the central part. In 2017, the surface of the larger pie was showing the furrows again, the crust of the smaller pie had thickened, but the soft lower layer was still present. In May, 2018, the larger pie showed the same type of topography as during our first visit, but the central smaller one was covered by a new 30-m diameter mudflow, apparently resulting from overturn of the surface crust in the central part where desiccation had preserved a residual soft lens.

As a result, the AAMV is regularly fed by soft mud erupting in the central part. Then, soft mud spreads and horizontally pushes the ring wall and the mud volcano appears to develop more horizontally than vertically.

**Mots-Clés:** mud volcano

<sup>\*</sup>Intervenant

## The plumbing system of pockmark clusters along anticline crests in the South China Sea

Patrice Imbert <sup>\*1</sup>, Chantelle Phung <sup>2</sup>, Cédric Bonnel <sup>3</sup>

<sup>1</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) – Avenue Larribau 64018 Pau Cedex, France

<sup>2</sup> Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs (LFC-R) – Université de Pau et des Pays de l'Adour,  
TOTAL, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5150 – France

<sup>3</sup> Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs (LFC-R) – Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA]  
– IPRA, France

Seismic interpretation of a set of three anticlines in the South China Sea revealed an intriguing pattern of seismic anomalies about 400 m below seabed. One seismic reflection shows at the crest of each structure a patch of high negative amplitudes, 1 to 5 km in diameter, roughly limited by a contour line of the structure; all three patches are surrounded by radiating medium-negative amplitude elongated triangles, 1 to 2 km long, a few hundred meters wide. The pockmark clusters develop above the central part of the high-amplitude patches, their outer limit also coinciding with a contour line. In section view, pockmarks affect the whole interval from the anomalies up to the seabed. Detail investigation of the seismic cube revealed a roughly comparable pattern some 80 m deeper, this time in the synclines. This lower pattern consists of flame-like, positive amplitude seismic anomalies, also following the dip of the structure (perpendicular to contours), but this time merging downslope into channel-like features that follow the synclinal axes. The upslope tips of the flames lie below the tips of the triangles of the upper set, and most of them seem to emanate from small faults. The following model is proposed to account for the observations: the conformance to structure of the negative high-negative amplitude patches is interpreted to indicate a gas contact in the upper level, which therefore coincides with a thin reservoir. The stacked pockmarks at the crest indicate that the structures have been leaking since the early stages of their burial. Flame-like medium amplitude anomalies surrounding the gas patch record ongoing gas migration from the tips of the flames upward along the reservoir. The interpretation of the lower interval, more speculative, is the following: the seismic polarity of the anomalies indicates that they correspond to thin high-impedance material, i.e. likely silt-rich carrier beds. They could represent deposits from submarine springs welling out of faults and remobilizing subsurface silt, or winnowing of surface deposits by brines emanating from the faults, in any case with hyperpycnal currents flowing downslope. These carrier beds were then used as migration pathways for (biogenic) gas generated in the sediment pile; gas accumulation in the tips of the flames eventually exceeded the fracturing pressure of the overburden, leading to vertical leakage up into the next reservoir and ultimately making pockmarks at the seabed. The full plumbing system therefore records successive episodes of water expulsion up to seabed through faults, then gas migration into accumulations and eventually repeated episodes of dysmigration to the seafloor.

**Mots-Clés:** pockmark, gas migration, submarine spring

\*Intervenant

## Intervenant Fossil plumbing system of oil and gas hydrocarbon seepage – impact on the shallow fluid migration system of the Hikurangi prism (North Island, New Zealand)

Pierre Malie <sup>\*1</sup>, Julien Bailleul <sup>2</sup>, Frank Chanier <sup>3</sup>, Sébastien Potel <sup>2</sup>, Geoffroy Mahieux <sup>4</sup>,  
Toullec Renaud <sup>2</sup>, Rafael Ferreiro Mählmann <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géosciences Université de Montpellier CC.60 Place E.Bataillon, 34095 Montpellier, Cedex 5- France

<sup>2</sup> UniLaSalle, UPJV, EA 7511 Basins-Reservoirs-Resources (B2R), F-60026 Beauvais, France

<sup>3</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – Université de Lille, ULCO , CNRS : UMR8187, France

<sup>4</sup> UPJV, UniLaSalle, EA 7511 Basins-Reservoirs-Resources (B2R), F-80000 Amiens, France -Jules-Verne - France

<sup>5</sup> University of Darmstadt – Institut für Angewandte Geowissenschaften, Allemagne

Cold seeps display a unique pathway of material transfer by migration of liquids, gases and sediments through the surface. To describe such fluid circulation systems three major elements, have to be considered: (1) the hydrocarbon formation in depth, (2) the plumbing system and (3) the seepage system. Fossil hydrocarbon seeps can be recognized by the identification of seep carbonates, or of their cemented plumbing systems known as fossil conduits of paleo-fluids. Previous work on numerous tubular carbonate concretions, outcropping in the uplifted onshore Hikurangi prism (eastern North Island of New Zealand), has demonstrated that they correspond to the shallow subsurface plumbing systems of paleoseeps. Early to Middle Miocene syn-subduction mudrocks in the Wairarapa Area, display some of these tubular carbonate concretions formed in a Miocene trench slope basin of the Hikurangi active margin. Our mapping and structural analysis indicate that a strong relationship exists between the principal tectonic fabrics and the occurrence of those tubular concretions. New structural and petrographic observations of the Middle Miocene paleoplumbing system demonstrate for the first time the presence of migrated solid bitumen within the tubular carbonate concretions and also in some of the major fault planes at the basin edge (e.g. Breakdown Fault zone). A multi-proxy approach was performed from some source rocks samples, from fault planes, and from tubular carbonate concretions and their host rocks to determine the organic matter maturity (organic petrography, Rock-Eval pyrolysis, vitrinite reflectance (VR) Rr% and solid bitumen reflectance (BR) Rr% (Rr: random reflectance). The main potential source rock of the basin, the Waipawa Formation (Late Pa- leocene black shales), appears to be thermally mature (VR = 0.8 to 0.9 Rr%) in the south of the study area and generated hydrocarbons. The occurrence of the Breakdown Fault zone filled by solid bitumen directly beneath the tubular carbonate concretions (BR = 0.68 Rr%) suggests that the hydrocarbons were sourced from deep within the subduction wedge, migrating upward along and/or beneath the fault toward a hydrate system associated with the development of the concretions.

**Mots-Clés:** Cold seep plumbing system, tubular carbonate concretions, New Zealand

<sup>\*</sup>Intervenant

## Mud volcano systems of the Central Nile Deep-Sea Fan

Flore Mary <sup>\*ψ</sup><sup>1</sup>, Sébastien Migeon <sup>1</sup>, Elia D'acremont <sup>2</sup>, Christian Blanpied <sup>2</sup>, Alain Rabaute <sup>2</sup>,  
Daniel Praeg <sup>1</sup>, Patrice Imbert <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Géoazur (GEOAZUR) – Université Pierre et Marie Curie (UPMC) - Paris VI, CNRS : UMR7329 – France

<sup>2</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTEPI) – Université Pierre et Marie Curie (UPMC) – Paris VI, CNRS : UMR7193 – France

<sup>3</sup> Total EP – Total EP – France

Mud volcanism is a common sedimentary process found in both onshore (Azerbaijan, Pakistan, Indonesia) and offshore environments (Mediterranean Sea, Barents Sea, Gulf of Mexico), in various geodynamical context. They are mostly associated with margins showing thick sedimentary accumulation and/or active tectonic stress. It results in a process of mobilization and expulsion of deep sediments associated with water, gas and/or occasionally brines. This fluid seepage phenomena involves various physical mechanism of deformation and mobilization like mud liquefaction, hydrofracturing and materials fluidization, always associated with overpressure fluids in depth. Mud volcanoes are the surface witness of large and deep complex system named "Mud Volcano System" (MVS) by Stewart and Davies (2006). It comprises (1) a deep source corresponding to the stratigraphic levels containing the overpressure fluids at the origin of these structures, (2) an intrusive domain corresponding to the "plumbing system" in the subsurface layers through which fluids migrate (feeder pipe), connecting the volcano to its source, and (3) an extrusive domain corresponding to the surface piercement structure (mud volcano). Because of their potential link to deep hydrocarbon reservoir or their high geohazard potential, those structures have attracted the attention of the scientific and industrial communities. Advances in underwater seabed imaging lead to discover and image, with ever higher-resolution data, numerous present-day and/or active mud volcanoes. Various types of morphologies were described ranging from regular conical shape structure with in some cases a crater on top, to flat mud pie, potentially associated with mud pools. Although the scientific community has made some progress in the understanding of some features of mud volcanoes within the last decade, many key questions dealing for example with the origin of their various morphologies, the internal architecture of the MVS and their functioning and evolution in time are still unresolved. What does the plumbing system look like in the three dimensions? Are there any variation in the architecture of the plumbing system between mud volcanoes? Is there a marker of mud-volcano system evolution in time? In this study, we analyzed and compared seabed and paleo MVS of the Central Nile Deep-Sea Fan (NDSF) province using petroleum 3D seismic-reflection data provided by TOTAL. We highlight morphological aspects and internal architectural elements that complement the knowledge of MVS of this area. Based on seabed characteristics and the observation of deep architectures, we finally propose a model of construction of MVS which show the structural and geometric timescale MVS evolution in this area.

Stewart, S.A. and Davies, R.J., 2006. Structure and emplacement of mud volcano systems in the South Caspian Basin. AAPG Bulletin, 90(5): 771-786.

**Mots-Clés:** South Eastern Mediterranean, Central Nile Deep Sea Fan, Mud volcano, Mud volcano system

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: flmary@geoazur.unice.fr

## Triggering and Evolution of a submarine landslide, Offshore Dakhla, West Morocco margin.

Benabdellouahed Massinissa \*<sup>1</sup>, Youssef Biari <sup>1</sup>, Frauke Klingelhoefer <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Domaines Océaniques (LGO) – Université de Bretagne Occidentale (UBO), Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), CNRS : UMR6538 – France

<sup>2</sup> Ifremer – Laboratoire Aléas géologiques et Dynamique sédimentaire – France

This study explores a portion of the West African margin at the junction between two well-known segments with destructive architecture characterized by giant slides: offshore western Sahara. In between, the Dakhla segment has been historically described as a constructional section. During the Dakhla cruise (2002), geophysical data were acquired on the North-West of Africa margin, offshore Dakhla, by IFREMER (French Institute for Marine Research), Total oil company and the university of Brest. 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 around latitude 23 N.

The analysis of multibeam bathymetry, high-resolution sub-bottom and reflection seismic data on the continental slope of offshore Dakhla reveal the existence of several discrete morphologies such as canyon, overpressured ridges and deformation with a large wave-length. Offshore Dakhla two types of seafloor depressions (or pockmarks) have been mapped around 1500 m of water depth in the center part of the multibeam survey. Like the ribbons, these are oriented NW-SE, parallel to the shoreline. We have seafloor depressions with circular forms of radius which varied 0.5 to 1 km and the seafloor depressions of elongated 0.5-1.5 km wide, 0.5-6 km long and up to 10-40 m deep. in addition, two scarps (S1 and S2) have been mapped around 2600m and 2300m of water depth.

These morphologies (pockmarks, overpressure ridges and scarps) are indices of sedimentary instabilities and slidings, that are probably still active. The rupture process of this slide seems to have been controlled by alignment pockmarks around 1500 mwd. These pockmarks related to listric faults are caused by sedimentary loads and sea level changes, attributed to SIM4-SIM2. However, scarps S1 locate around 2600m and S2 locate around 2300m are attributed respectively to SIM8 and SIM6. Despite the presence of these instability figures, the actual margin profile remains therefore constructive but a change in gas hydrate stability conditions could trigger the effective sliding of this part of the margin, offshore Dakhla.

**Mots-Clés:** Dakhla, Morocco margin Slide, Bathymetry, Seismic, Pockmarks, Overpressure ridges, Scarps.

\*Intervenant

## Controls on canyon formation along the Atlantic Atlas offshore Moroccan Meseta : Uplift and Submarine Terraces of West Morocco margin

Benabdellouahed Massinissa <sup>\*ψ1</sup>, Youssef Biari <sup>2</sup>, Frauke Klingelhoefer <sup>3</sup>, Marc-Andre Gutscher <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Domaines Océaniques (LGO) – Université de Bretagne Occidentale (UBO), Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), CNRS : UMR6538 – France

<sup>2</sup> Domaines Océaniques (LGO/IUEM) – UMR6538 – France

<sup>3</sup> IFREMER – Laboratoire Aléas géologiques et Dynamique sédimentaire – France

<sup>4</sup> CNRS-UBO-UBS – CNRS : UMR6538 – France

The Moroccan continental slope morphology has been analyzed offshore the Meseta domain offering new insights into active tectonic and sedimentary processes. Re-examination of marine geophysical data from the continental margin of West Morocco reveals a broad zone characterized by deformation, active faults and updoming offshore the High Atlas (Morocco margin), situated next to the Tafelney Plateau. Both seismic reflection and swath-bathymetric data, acquired during Mirror marine geophysical survey in 2011, indicate recent uplift of the margin including uplift of the basement. This deformation, which we propose to name the Atlantic Atlas tectonic arch, is interpreted to result largely through uplift of the basement, which originated during the Central Atlantic rifting stage - or even during phases of Hercynian deformation. This has produced a large number of closely spaced normal and reverse faults, "piano key faults", originating from the basement and affecting the entire sedimentary sequence, as well as the seafloor. The presence of four terraces in the Essaouira canyon system at about 3500 meters water depth and "piano key faults" and the fact that these also affect the seafloor, indicate that the Atlantic Atlas is still active north of Agadir canyon. We propose that recent uplift is causing morphogenesis of four terraces in the Essaouira canyon system. The process of reactivation of passive margins is still not well understood and the region north of Agadir canyon represents a key area to better understand this processes. Indeed, we interpret that these uplift events occurred mainly during the Plio-Quaternary in response to the collision between the Eurasian and African plates and are probably still active today, posing a significant range of geohazards locally and further afield.

**Mots-Clés:** Atlantic Atlas, Tectonic arch, Moroccan passive margin, Submerged terraces, Uplift

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: massinissa.benabdellouahed@gmail.com

## Sequence Stratigraphy and sedimentary dynamic of the Upper Cretaceous-Paleogene Moroccan phosphate

Mustapha Mouflih <sup>\*ψ1</sup>, Essaid Jourani <sup>2</sup>, Abdelmajid Benbouziane <sup>1</sup>, Amine Bouwafoud <sup>1</sup>,  
Mohamed Amine Nguidi <sup>1</sup>, Hanane El Boukhari <sup>1</sup>, Salem El Ouariti <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Dynamique des Bassins Sédimentaires et Corrélations Géologiques, Faculté des Sciences Ben M'sik,  
Université Hassan II de Casablanca (UNIVH2C-FSB) – Maroc

<sup>2</sup> Direction de Géologie, Direction Développement Industriel, OCP s.a (OCP S.A) – Maroc

Sequence stratigraphy becomes the most improved geology tool for high resolution correlations. In this work, we propose to apply the concepts of sequence stratigraphy in order to suggest a depositional model of phosphate deposits in their local context. The upper Cretaceous-Paleogene (Maastrichtian-Lutetian) is a worldwide reference for its richness in phosphate deposits. In Morocco, they are recognized mainly in four basins: Oulad Abdoun, Ganntour, Meskala and Oued Eddahab Basins.

The sequence stratigraphy established was based on the field observations and well logging made in the center of Morocco basins. The Sedimentological interpretations indicate marine fluctuations which are driven by eustatic variations and tectonic movements that are in relation to the basement and the basin structure/morphology.

During the transgression period, the transgressive systems tracts affiliates to the progress of the marginal-littoral domain. This tract develops terms that are very rich in P2O5. In the regression period, the phosphate deposits are dwarfed in P2O5 and get associated with more proximal facies. During the forced regression, the valley excavation takes place at the margin basins, which drains the terrigenous products towards the parts of the external proximal platform (which is still under the influence of the sea). The presence of terrestrial fauna in certain marine phosphate terms represents an evidence of this regressive dynamism (*Phosphaterium Esquii*, the oldest terrestrial elephant of Africa was discovered in the Oulad Abdoun basin). The valley fill deposits are silty and slightly phosphated (Oulad Smain and Youssoufia silty sets) in the proximal areas and rich sandy coprolitic phosphates in the deeper proximal zones. However, the distal areas develop prograding phosphate sedimentation. It is marked by an intense and various silicification.

The regressive sedimentary systems tracts are linked to transgressive intervals of the third order eustatic cycles. The narrow sea-type paleogeography, the morphology of the troughs of the plat-form at that time together with the importance of the waves and marine currents of the regressive dynamics following the phases of marine sea-level fall have all contributed to the mobilization, formation, spreading and re-deposition of the phosphate sediments into lens-shaped phosphatic bodies. Such dynamics implies a reworking of sediments ending the facies sequences and the installation of the coarse, P2O5 rich phosphate sediments.

**Mots-Clés:** Phosphate, Upper Cretaceous, Paleogene, Sedimentology, Sequence Stratigraphy, Oulad Abdoun, Morocco.

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: moufli@yahoo.fr

## Sandstone and carbonate concretions in the middle Miocene rocks in Tenes area (Lower Chelif Basin, Nord-West Algeria): anatomy and origin.

Abdelkrim Nemra <sup>\*1</sup>, Abdelkader Ouali Mehadji <sup>1</sup>, Axel Munnecke <sup>2</sup>, Salim Belkhedim <sup>\* 1/3</sup>, Radouane Sadji <sup>3</sup>, Lahcene Belkhedim <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Paléontologie Stratigraphique et Paléoenvironnements, Université d'Oran 2 - Algérie

<sup>2</sup> GeoZentrum Nordbayern, Fachgruppe Paläoumwelt, Loewenichstraße 28, D-91054 Erlangen, Allemagne

<sup>3</sup> Laboratoire de Géodynamique des Bassins et Bilan Sédimentaire, Bir El Djir - Algérie

The middle Miocene rocks of Tenes area, situated in the North-East of Lower Chelif Basin, in the North-West of Algeria, expose locally two types of concretions newly investigated: calcite-cemented sandstone concretions "CCSC", and carbonate concretions "CC". In this work, these concretions have been studied in two easily accessible localities: Ounsour Anhas and Vieux Tenes outcrops.

Calcite-cemented sandstone concretions "CCSC" are recorded in very thick sandstones (sandstones unit). According to their morphology, they can be distinguished into two types: (i) nodular concretion (spheroidal ellipsoidal, and irregular nodule shape), and (ii) stratiform concretions. These "CCSC" are made up mainly by quartz, and green glauconite grains embedded within microsparry calcite cement. The biogenic contents are represented by dissolved shell fragments and microfauna (essentially foraminifera). Isotopic analysis of "CCSC" show depleted values of  $\delta^{18}\text{O}$  (-10,71 to -9,81 ‰) and slightly depleted values of  $\delta^{13}\text{C}$  (-2,32 to -3,03). These results reflect meteoric pore water influence during concretion growth in diagenetic conditions.

Carbonate concretions "CC" were observed hosted in the marls (marls unit). They exhibit three types: nodular concretions (spheroidal ellipsoidal, disk and irregular nodule shape), stratiform concretions and tubular concretions. Most of tubular concretions are characterized by central conduit. These "CC" are associated with the synsedimentary instability features (synsedimentary faults, slumps) and normal faults, which are well pronounced in Ounsour Anhas outcrop. They consist of silt-sized and very fine-sand sized grains of quartz interspersed within cemented micritic matrix. The positive to negative  $\delta^{13}\text{C}$  values (-9,82 to +5,85 ‰ PDB) are interpreted as the result of the balance between the 13C-enriched (residual CO<sub>2</sub> from methanogenesis) and 13C-depleted (microbial organic-matter decomposition) added to the pore solutions in the active methanogenesis zone. The low enriched  $\delta^{18}\text{O}$  values in these "CC" indicate that carbonates have been mainly precipitated in low to moderately low temperature normal marine pore fluids whereas the low depleted  $\delta^{18}\text{O}$  values reflect relatively higher temperatures or periods of gas hydrate formation. Consequently, the "CC" were formed by the precipitation of carbonate micrite cement within the host marls at shallow burial depth in the active methanogenesis zone.

**Mots-Clés:** Calcite, cemented sandstone concretions, meteoric pore water, carbonate concretions, synsedimentary instability, methanogenesis zone, middle Miocene, Algeria.

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: saligeol@gmail.com

## Sandstone and carbonate concretions in the middle Miocene rocks in Tenes area (Lower Chelif Basin, Nord-West Algeria): anatomy and origin.

Abdelkrim Nemra <sup>\*1</sup>, Abdelkader Ouali Mehadji <sup>1</sup>, Axel Munnecke <sup>2</sup>, Salim Belkhedim <sup>\* 1/3</sup>, Radouane Sadji <sup>\*3</sup>, Lahcene Belkebir <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Paléontologie Stratigraphie et Paléoenvironnement, Université d'Oran, 31000, Algeria

<sup>2</sup> GeoZentrum Nordbayern, Fachgruppe Paläoumwelt, Loewenichstraße 28, D-91054 Erlangen, Allemagne

<sup>3</sup> Laboratoire de Géodynamique des Bassins et Bilan Sédimentaire, Bir El Djir - Algérie

Study of carbonate concretions is mostly employed to understand the circulation, the migration and the evolution of fluids in their environments. The middle Miocene rocks of Tenes area, situated in the North-East of Lower Chelif Basin, in the North-West of Algeria, expose locally two types of concretions newly investigated: calcite-cemented sandstone concretions "CCSC", and carbonate concretions "CC". In this work, these concretions have been studied in two easily accessible localities: Ounsour Anhas and Vieux Tenes outcrops. The goal is to understand the overriding mechanisms responsible the formation of these carbonate concretions.

Calcite-cemented sandstone concretions "CCSC" are recorded in very thick sandstones (sandstones unit). According to their morphology, they can be distinguished into two types: (i) nodular concretion (spheroidal ellipsoidal, and irregular nodule shape), and (ii) stratiform concretions. These "CCSC" are made up mainly by quartz, and green glauconite grains embedded within microsparry calcite cement. The biogenic contents are represented by dissolved shell fragments and microfauna (essentially foraminifera). Isotopic analysis of "CCSC" show depleted values of  $\delta^{18}\text{O}$  (-10,71 to -9,81 ‰) and slightly depleted values of  $\delta^{13}\text{C}$  (-2,32 to -3,03). These results reflect meteoric pore water influence during concretion growth in diagenetic conditions.

Carbonate concretions "CC" were observed hosted in the marls (marls unit). They exhibit three types: nodular concretions (spheroidal ellipsoidal, disk and irregular nodule shape), stratiform concretions and tubular concretions. Most of tubular concretions are characterized by central conduit. These "CC" are associated with the synsedimentary instability features (synsedimentary faults, slumps) and normal faults, which are well pronounced in Ounsour Anhas outcrop.

They consist of silt-sized and very fine-sand sized grains of quartz interspersed within cemented micritic matrix. The positive to negative  $\delta^{13}\text{C}$  values (-9,82 to +5,85 ‰ PDB) are interpreted as the result of the balance between the  $^{13}\text{C}$ -enriched (residual  $\text{CO}_2$  from methanogenesis) and  $^{13}\text{C}$ -depleted (microbial organic-matter decomposition) added to the pore solutions in the active methanogenesis zone. The low enriched  $\delta^{18}\text{O}$  values in these "CC" indicate that carbonates have been mainly precipitated in low to moderately low temperature normal marine pore fluids whereas the low depleted  $\delta^{18}\text{O}$  values reflect relatively higher temperatures or periods of gas hydrate formation. Consequently, the "CC" were formed by the precipitation of carbonate micrite cement within the host marls at shallow burial depth in the active methanogenesis zone.

**Mots-Clés:** Calcite, cemented sandstone concretions, meteoric pore water, carbonate concretions, synsedimentary instability, methanogenesis zone, middle Miocene, Algeria.

\*Intervenant

## Lake Acigol, SW Anatolia: potential to reconstruct the respective influence of climate and tectonics on a long (ca. 2 My) lacustrine sequence

Claire Rambeau <sup>\*ψ1</sup>, Syed Blawal <sup>1</sup>, Taib Ur Rehman <sup>1</sup>, François Demory <sup>2</sup>, Pierre Rochette <sup>2</sup>, Anne-Elisabeth Lebatard <sup>2</sup>, Mireille Perrin <sup>2</sup>, Valérie Andrieu-Ponel <sup>3</sup>, Mehmet Cihat Alçıçek <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Sedimentology, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg – Allemagne

2 CEREGE – CNRS : UMR7330, IRD : UMRD161, Aix Marseille Université, UM34, U M R7330, INRA

<sup>3</sup> Institut méditerranéen de biodiversité et d’écologie marine et continentale (IMBE) – CNRS : UMR7263, IRD: UMR237 ; Aix Marseille Université ; Université d’Avignon et des Pays de Vaucluse :- France

<sup>4</sup> Pamukkale Univ. Dept. of Geology, 20070, Denizli – Turquie

Lake Acigol ( $37^{\circ}49'35.00''N$ ,  $29^{\circ}53'27.49''E$ ) in SW Anatolia is located in a large tectonic basin and is nowadays a shallow-water water body submitted to strong evaporation. The lake was cored for economic reasons by the Turkish companies ALKIM and SODAS, producing lacustrine sequences of up to 600 m length. Datation by magnetostratigraphy (Demory et al. 2016) established the base of the longer core at more than 2 My. These exceptionally long archives offer the opportunity to reconstruct continental environmental fluctuations for a large part of the Quaternary, as well as to explore the respective influence of climate and tectonics on the lake's deposits.

This contribution investigates the possibilities to determine the long-term sedimentary evolution of Lake Acigol, as well as shorter-term fluctuations, and to disentangle climatic and tectonic influences on the lake's dynamics, based on variations in lacustrine facies types as well as in the mineralogical and isotopic composition of the sediments. Climatic changes, in particular glacial-interglacial cycles, probably influenced lake levels and therefore the sediments' composition; on the other hand, the punctual impact of tectonic events is strongly suspected, particularly on the basis of short-term grain-size variations recorded in the sequence.

Such long-term continental archives are of particular interest since reconstructing both longterm and shorter-term environmental fluctuations in SW Anatolia will also help understand better the potential for hominids en route from Africa to cross the eastern Mediterranean region.

*This research has been supported by a TUBITAK-CNRS bilateral cooperation (grant number 114Y723), by the ECCOREV Research Federation (OSU PYTHEAS, CNRS, AMU), the CNRS Program Tellus-INTERRVIE and by the Wissenschaftliche Gesellschaft Freiburg im Breisgau. We acknowledge the ALKIM and SODAS companies for their permission and support in the field.*

*Demory F, Perrin M, Alçıçek MC, Lebatard A-E, Nomade S, Andrieu-Ponel V, et al. Preliminary results on a promising long paleoclimatic archive for the Near East: the lacustrine sequence of Acigol (Anatolia, Turkey). Poster, EGU, April 2016; Vienna, Austria.*

**Mots-Clés:** Quaternary, Lake, Anatolia, Climate, Tectonics

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: claire.rambeau@geologie.uni-freiburg.de



## Stratigraphic and tectonic evolution of the contouritic Blake Plateau (Bahamas)

Audrey Recouvreur <sup>\*1</sup>, Thierry Mulder <sup>1</sup>, Hervé Gillet <sup>1</sup>, Jean Borgomanero <sup>2</sup>

<sup>1</sup> UMR 5805 Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (EPOC) – Université de Bordeaux – France

<sup>2</sup> Centre européen de recherche et d'enseignement de géosciences de l'environnement (CEREGE) – Aix-Marseille Université - AMU – France

High-resolution multichannel seismic data were recovered during the cruises Carambar and Carambar 2 of the Carambar project, in 2010 and 2016-17, resp. more than 5 000 km of seismic profile were acquired along the Little Bahama Bank, covering its entire northern slope from the shallow platform to the abyssal plain, including the south part of the Blake Plateau. These seismic lines cover also two giant carbonate canyons, the Little Abaco and the Great Abaco Canyons and the contouritic deposits covering the flooded Mesozoic carbonate platform on the Blake Plateau. The seismic architecture of the southern part of the Blake Plateau, also imaged and analyzed previously with subsurface data, shows a succession of well-defined seismic facies. In particular, the first two seismic facies display particular features. The facies on top exhibits continuous very high amplitude parallel reflectors and the facies below shows continuous high amplitude parallel reflectors. These could be interpreted as the expression of contouritic deposits. Numerous structures can also be observed. Faults or fractures appear to affect the whole plateau but also certain seemed to be constrained to special seismic facies. It could be related to the Great Abaco Fracture zone. Furthermore, diffuse dome-shaped structures occurring within seismic facies could be related to diapirs. These new data can bring new information on the timing of contourite deposition on the Blake Plateau by comparing our results with those of the DSDP expedition 44 and the ODP expedition 171b. It will also bring new evidences to decipher the tectonic evolution of the area and the structural control of large-scale structures, with a particular focus on the impact of upward fluid motion in sediment. Overall, this analysis can provide new clues on the origin of these unusual deep gigantic carbonate canyons and their persistence through time.

**Mots-Clés:** Carbonate, stratigraphy, contourites, plateau

<sup>\*</sup>Intervenant

## Tectonic and stratigraphic framework of the collapse surfaces developing at the transition between the prodeltaic system and the turbiditic basin of the Castisent Formation (Aínsa Basin, Pyrenees)

Nicolas Saspiturry <sup>\*1</sup>, Etienne Fayolle <sup>2</sup>, Philippe Razin <sup>1</sup>, Carine Grélaud <sup>1</sup>, Emmanuelle Chanvry <sup>3</sup>

<sup>1</sup> ENSEGID – Institut polytechnique de Bordeaux – France

<sup>2</sup> Institut national d'études supérieures agronomiques de Montpellier – France

<sup>3</sup> IFP Energies nouvelles (IFPEN) – IFP Energies Nouvelles – France

The South Pyrenean Foreland basin have been widely study to characterized the syn-orogenic interactions between sedimentary record and thrusting. The eastern edge of the *Aínsa* Basin is a good laboratory to better constrained the late Ypresian *Castisent* Formation (Fm) sedimentary record at the transition between the prodeltaic system and the turbiditic basin, in between the Foradada fault zone (east) and the *Atiart* Thrust (west). This work highlights the tectono-sedimentary processes responsible of the destabilization and the development of collapse erosional surfaces affecting the shelf margin in the South-Pyrenean piggy-back basin. The *Castisent* Fm. is bordered at the base by the *Atiart* surface affecting the deltaic deposits of the *Castigaleu* Fm. and on top by the *Lascorz* surface cannibalizing the top of the *Castisent* deposits. These erosional surfaces are respectively associated with the *Fosado-Torla* and *Gerbe-Cotefablo* channel-fill turbiditic complexes. In this work the *Castisent* Fm. is divided into four main units. The first one filled the *Atiart* surface and corresponds to thick distal basin facies, with top composed of prodelta westward isopach prograding wedges showing no evidence of tectonic deformation. The second and third units are materialized by the westward progradation of a wave influenced deltaic system synchronous to the activity of the *Atiart* thrust. At this time, the deltaic system of the *Castisent* Fm. is unaffected by major erosional canyon and bypass processes. The *Pocino-1* and *Pocino-2* minor erosional surfaces are both linked to the *Atiart* Thrust activity and the backstep of the *Castisent* deltaic system. The eastern branch of this thrust controls the location of the *Pocino* surfaces and the accommodation rate increase in a minor frontal thrust syncline. The *Castisent* 4 unit is materialized by an eastward transgressive system tract, that completely flood the previous prograding deltaic system. The *Lascorz* major collapse surface develops following this thick transgressive sequence. The *Atiart* and *Lascorz* collapse surfaces affecting the shelf margin deposits of the *Castigaleu* and *Castisent* Formations seems to developed following a huge increase of the accommodation rate and the backstep of the deltaic systems. These accommodation rate increase is interpreted to be driven by the regional piggy-back basin development. On the contrary, during the progradation of the *Castisent* deltaic system the shelf margin seems to be unaffected by significant destabilization processes.

**Mots-Clés:** Collapse, surface, Syn, orogenic, Pyrenees

\*Intervenant

## Les cheminées carbonatées de la marge Hikurangi (Nouvelle-Zélande, île Nord) : mise en place et traçage des circulations de fluides en contexte de marge active

Renaud Toullec <sup>\*ψ1</sup>, Julien Bailleul <sup>1</sup>, Pierre Malié <sup>1,2</sup>, Franck Chanier <sup>3</sup>, Geoffroy Mahieux <sup>4</sup>,  
Vincent Caron <sup>4</sup>, Sébastien Potel <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Equipe B2R : Bassins, Réservoirs, Ressources- EA 7511 - Institut UniLaSalle Beauvais - France

<sup>2</sup> Géosciences Montpellier - Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc - France

<sup>3</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG), UMR 8187 - Université de Lille - France

<sup>4</sup> Equipe B2R : Bassins, Réservoirs, Ressources- EA 7511 - UPJV Université Picardie Jules Verne - France

L'île nord de Nouvelle-Zélande présente un intérêt tout particulier pour l'étude des marqueurs d'expulsions de fluides en contexte de marge active.

Deux zones ont été investiguées uniquement au niveau du prisme d'accrétion émergé d'Hikurangi : le synclinal d'Akitio (Miocène inférieur-moyen) et les falaises de Cape Turnagain (Miocène supérieur). Le but de l'étude est de retracer et de comparer l'historique et la nature des fluides par l'analyse de concrétions tubulaires dont la morphologie et les phases diagénétiques diffèrent entre les deux zones. Dans les deux cas, l'encaissant est systématiquement composé de boue carbonatée lithifiée très riche en pyrites fromboïdales authigéniques et en faunes très peu diversifiées, indiquant des conditions de stress environnemental. Concernant les tubes eux-mêmes, leur morphologie, leur taille (diamètre et longueur ainsi que leur paragenèse diffèrent grandement).

Dans les formations du bassin d'Akitio, ils sont de dimension réduite (métrique à infra-décimétrique), et souvent très "bulbeux", leur paragenèse indiquant un développement polyphasé complexe, parfois brutal avec des signes de fracturation hydraulique et injections de boue ayant généré des fragments cimentés précocement par de l'aragonite et de la calcite prismatique. En outre, des traces de circulation de fluides hydrocarbonés sont prouvées par la présence de bitumes recouvrant les ciments précoce calcitiques et aragonitiques.

Dans les formations de Cape-Turnagain, les tubes sont pluri-métriques et très réguliers avec cimentations progressives, sans injections importantes et soudaines de boue. En complément, 80 mesures isotopique  $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$  et 9 mesures de  $87\text{Sr}/86\text{Sr}$  ont été réalisées sur les ciments et l'encaissant, contrôlées par des observations systématiques en cathodoluminescence. La plupart des mesures  $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$  s'éloignent des valeurs marines normales du Miocène avec une influence certaine de l'oxydation bactérienne du méthane, surtout dans la zone d'Akitio où le  $\delta^{13}\text{C}$  est systématiquement plus faible qu'à Cape Turnagain. Si le remplissage tardif de certains tubes semble avoir subi une altération météorique, les autres phases de cimentation doivent faire intervenir des fluides aussi profonds que ceux mis en contact avec les formations du Miocène inférieur - moyen et possiblement Crétacé, lesquelles influencerait la chimie des fluides expulsés dans les niveaux supérieurs jusque dans le Miocène supérieur.

**Mots-Clés:** Nouvelle zélande, Hikurangi, Akitio, Cape Turnagain, fluides, cheminées carbonatées, diagenèse, isotopie

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: renaud.toullec@unilasalle.fr



26<sup>e</sup> édition | Réunion des Sciences de la Terre | 26th edition | Earth Sciences Meeting

## 1.6. Diagenèse/Authigenèse

## Peut-on reconstruire les paléo-environnements lorsque les sédiments sont absents ? Résultats de l'analyse des ciments précoce de discontinuités par analyse géochimique in situ (SIMS et LA-ICP-MS)

Simon Andrieu <sup>\*ψ1</sup>, Benjamin Brigaud <sup>2</sup>, Jocelyn Barbarand <sup>2</sup>, Eric Lasseur <sup>1</sup>, Frédéric Haurine <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) -France

<sup>2</sup> Géosciences Paris Sud (GEOPS) – Université Paris Sud - Paris XI, CNRS- CNRS : UMR8148 - France

Les plateformes carbonatées sont marquées par des périodes d'arrêt de sédimentation à l'origine de la formation de "discontinuités sédimentaires", dont les mécanismes de formation restent difficiles à caractériser. Ces dernières sont associées à la précipitation de ciments "précoce", dont la taille dépasse rarement quelques dizaines de micromètres. Leur dimension réduite rend leur caractérisation chimique compliquée car les méthodes d'analyse par spectrométrie de masse après attaque acide nécessitent de prélever des quantités trop importantes de carbonate. La taille d'investigation est, pour la caractérisation des discontinuités, un verrou important pour comprendre leur formation. Dans cette étude, le couplage (1) de la microsonde ionique (SIMS 1280), et (2) d'un spectromètre de masse à source "plasma" couplé avec un système d'ablation laser (LA-ICPMS-HR) est proposé afin de travailler directement sur les lames minces à l'échelle des ciments. Ces deux méthodes permettent de déterminer les valeurs en  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^{13}\text{C}$  ainsi que les concentrations en éléments majeurs (Mg, Al, Mn, Fe) et traces (Éléments des Terres Rares) des ciments carbonatés. Le but de cette étude est de caractériser, par l'analyse des ciments calcitiques précoce, les conditions paléo-environnementales pendant la formation des discontinuités. Plusieurs discontinuités clefs d'âge Jurassique moyen et supérieur des bassins de Paris et d'Aquitaine ont été sélectionnées. Les observations aux microscopes photonique, électronique et à cathodoluminescence montrent que les ciments précoce sont diversifiés, composés de dix-huit types différents incluant des ciments fibreux, des "dents de chien" ou encore des ménisque sparitiques à micritiques. Les analyses isotopiques et géochimiques des éléments majeurs et traces montrent que ces ciments cristallisent dans des environnements très variés pendant les périodes de non sédimentation. Les discontinuités enregistrent une succession de nombreux événements, incluant des périodes d'émersion, de transgression, des variations des conditions oxydo-réductrices ou de l'activité microbienne. L'étude de la chimie des phases calcitiques précoce ouvre de nouvelles perspectives pour remonter à l'histoire des périodes de non-sédimentation et proposer des modèles de formation des discontinuités sédimentaires tenant compte de l'hydrodynamisme, de l'activité microbienne ou encore des conditions redox.

**Mots-Clés:** Carbonate, diagenèse, discontinuités, ciments précoce, isotopes du carbone et de l'oxygène, terres rares, SIMS, LA, ICPMS, HR

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: simonandrieu0@gmail.com

## Fault zones diagenesis through time: impact on drain properties. Case study in Urgonian carbonates of La Fare massif (Provence – SE France).

Irène Aubert <sup>\*1</sup>, Juliette Lamarche <sup>1</sup>, Philippe Léonide <sup>1</sup>, Roland Salardon <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, Coll France, CEREGE – 3 Place Victor Hugo, 13331 Marseille, France

Carbonates are very sensitive to diagenetic processes that strongly impact initial rock petrophysical properties (porosity, permeability). These changes tend to be accentuated when the rock is affected by fault zones where brittle deformations (fault plane, fractures, breccias) are fluid pathways. This fluid circulation leads to the formation of specific diagenetic stages which impact rock properties. The aim of this study is to establish how the properties (drain/barrier) of the different fault zone evolve during different geodynamic context (burial, uplift, extension) by (1) identifying the impact of fault activities on diagenetic properties of the host rock through time and (2) determining nature and composition of formation fluid. To this end, we targeted fault zones located on the eastern part of La Fare anticline near Marseille. We studied two polyphase faults zones (Castellas fault, D19 faults) affecting Urgonian carbonates (Lower Barremian). These fault zones were active during the Mid-Cretaceous uplift (Durance uplift) and Pyrenean shortening. We sampled 4 transects perpendicular to fault, gathering 119 plugs and proceeded to porosity measurements. Thin sections observation with cathodoluminescence technique evidenced 11 diagenetic stages that affect the carbonate rock since its deposition. Isotopic measurements and Scanning Electron Microscopy have also been performed on thin sections to determine isotopic and elemental chemistry of formation fluids. This study shows that the diagenesis linked to fault zone strongly impact the petrophysical properties of Carbonate that closed the porosity near the fault. The porosity decrease is linked to two specific cementation phases depending on the fault zones, despite the fact that these fault zones both played during the pyrenean shortening. This diagenetic difference highlights that first Castellas fault activation during Durance uplift strongly impact fault zone properties minimizing influence of later diagenetic stages.

**Mots-Clés:** Fault zones, Urgonian Carbonates, Diagenesis, Geochemistry, reservoir properties

\*Intervenant

## Influence of early diagenesis on geotechnical properties of clay sediments (Romania, Black Sea)

Gregory Ballas <sup>\*1,2</sup>, Sébastien Garziglia <sup>1</sup>, Nabil Sultan <sup>1</sup>, Ewan Pelleter <sup>1</sup>, Samuel Toucanne <sup>1</sup>,  
Tania Marsset <sup>1</sup>, Vincent Riboulot <sup>1</sup>, Stephan Ker <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unité de recherche Géosciences Marines (Ifremer) (GM) – Institut français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer – France

<sup>2</sup> Géosciences Montpellier, Université de Montpellier, CNRS: UMR5243 – France

The geotechnical properties of clay sediments were investigated using laboratory and in-situ measurements as part of the geohazard assessment in the Romanian sector of the Black Sea affected by landslides and deformation features. The sediments were characterized as predominantly high plastic silty clay of high compressibility, low undrained shear strength, low cohesion and moderate sensitivity. A shallow increase in shear strength exceeding the general trend could have been reconciled with evidence for the precipitation of iron sulfides and calcium carbonates related to early diagenetic reactions of sulfate reduction (e.g. cryptic sulfur cycle) and anaerobic oxidation of methane. Comparison of the compression behaviour of natural and reconstituted samples indicated that precipitation of these materials at particle contacts produced cementation. The analysis of deeper sediments sharing similar geochemical properties illustrated that the early precipitation of even low quantity of sulfur and carbonate cements allowed clays to develop sufficient strength to preserve an abnormal high water content even under tens of meters burial depth. Because this cementation process was observed to be associated with an enhanced sensitivity and a strain softening response to undrained shearing it was concluded that such early diagenesis should be considered as a key environmental factor, leading to weak layer formation that may influence the susceptibility of seafloor to failure.

**Mots-Clés:** lacustrine clay sediment, structured material, sulfur cement, carbonate cement, early diagenesis, weak layer

Intervenant

## Are asymmetric cements always good indicators of vadose diagenesis?:Insight from the Lower Pliensbachian of Traras Mountains (North-West Algeria)

Salim Belkhedim <sup>\*1,2</sup>, Axel Munnecke <sup>2</sup>, Emilia Jarochowska <sup>2</sup>, Miloud Benhamou <sup>1</sup>,  
Abdelkrim Nemra <sup>\* ψ3</sup>, Radouane Sadjı <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Géodynamique des Bassins et Bilan Sédimentaire, BP. 1524, nouveau Pôle universitaire Belgaïd, Bir El Djir – Algérie

<sup>2</sup> GeoZentrum Nordbayern, Fachgruppe Paläoumwelt, University of Erlangen-Nuremberg, Loewenichstr. 28, 91054 Erlangen, Germany – Allemagne

<sup>3</sup> Laboratoire de Paléontologie Stratigraphie et Paléoenvironnement, Université d'Oran, 1524, El M'naouer, Oran 31000 – Algérie

Pendant cements, i.e. asymmetric precipitated crusts, concentrated on the undersides of grains are thought to be limited to the vadose zone (marine or meteoric), where water driven by gravitational drainage has filled pores only periodically and partially. Such asymmetric cements have been recorded in thin sections from the Ras El Manara section (Zailou Formation) in the Traras Mountains (North-West Algeria). The presence of geopetal fabrics within this thin section highlighted the fact that these seemingly "pendant cements" are in fact oriented upwards, in the opposit direction than expected. In some places nucleate from sand grains (ooids, oncoids, bioclasts) towards the pore centers. These observations contradict the former interpretations, which relate their origin to the gravitational accumulation of water on the bottom sides of grains as pendant droplets. Other mechanisms for the formation of these asymmetric cements have to be considered. A detailed microscopic study reveals grainstone to rudstone texture, which indicates a high-energy setting, with an originally high-permeability. Such are favorable for a high fluid flow within the sediment, resulting in an early cementation with isopachous fibrous marine cements, developed within subtidal conditions. This rapid early lithification decrease slightly the high-permeability. The pore center-oriented asymmetric cements, which overgrow the isopachous cements, indicate high horizontal permeability, enabling a high-fluid circulation through pores, also under subtidal conditions (phreatic marine zone). The next – asymmetric – cements are oriented towards the pore center, where fast flow velocity prevails. This allows cements to grow preferentially in the direction, from which CaCO<sub>3</sub> is supplied in the center of the pores. In the relatively far and protected areas of thin section, these asymmetric cements are rarely developed, because the stagnant seawater does not provide enough CaCO<sub>3</sub>, necessary for precipitation. In some places, when the cements develop only from one side, upon components exposed to high-energy, they mimic real pendant cements, and without the presence of geopetal fabrics, which indicate their true orientation, these asymmetric cements could easily be misinterpreted as being developed in the vadose zone. Therefore, the presence of other indices of temporary emergence (meniscus cements, fenestrate fabrics...) are important to confirm the vadose settings, because, under specific conditions, the asymmetric cements could be also developed in the phreatic zone. In the light of these results, the term asymmetric cements is more appropriate to design all types of anisopachous cements formed either in vadose or phreatic zone setting.

**Mots-Clés:** Asymmetric cements, horizontal permeability, vadose zone, phreatic zone, geopetal fabrics, early cementation, Algeria

## Origin and genesis of disturbed areas in the Boucraa phosphate deposits (Oued Eddahab basin, Morocco)

Amine Bouwafoud <sup>\*ψ1</sup>, Mohamed Amine Nguidi <sup>1</sup>, Mustapha Mouflih <sup>\*φ1</sup>, Es Said Jourani <sup>2</sup>,  
Abdelmajid Benbouziane <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Dynamique des Bassins Sédimentaires et Corrélations Géologiques, Faculté des Sciences Ben M'sik,  
Université Hassan II de Casablanca (UNIVH2C-FSB) – Maroc

<sup>2</sup> Direction de Géologie, Direction Développement Industriel, Office Chérifien des Phosphates (OCP S.A) – Maroc

Moroccan phosphates have been marked by their exceptional richness in synsedimentary and post-diagenetic phenomena. In this work our study focus on areas (sterile bodies) qualified as "dérangements or disturbances" by the miners of the Office Chérifien des Phosphates (OCP S.A). These structures generate losses, disruptions in ore exploitation operations and distort reserves calculations.

The phosphate series of the Boucraa deposit is formed essentially by three main layers of phosphates sandwiched between siliceous and chalky formations which are often brecciated.

Following the sedimentological study, it appears that these structures are related mainly to the gravitational collapses of Sinkhole. The origin of its structures is related to the presence of multiple fractures, the sediments load, the dissolution of gypsiferous facies intensely present along the phosphate series and the posterior meteoric circulations. These gypsiferous facies, in intercalation between the phosphate layers, occur in association with the marly, clay and siliceous facies of the phosphate series in different forms: in rosette, fibrous and different sizes (centimetric to decimetric beds).

The subsequent changes in this structure have been made by the alteration and intense brecciation of the chaotic materials and it's marked by the appearance of siliceous endokarst facies in quartzites and clastic sandstones, ferriferous laterites and dolomitic brecciated limestones. The whole presents a colored patina, white to yellowish. Moreover, the random spatial distribution of these sinkholes suggests a source of supply of aggressive meteoric waters that infiltrate through a random surface structure.

**Acknowledgment:** The Authors would like to acknowledge the support through the R&D Initiative – Appel à projets autour des phosphates APPHOS – sponsored by OCP, project ID \* GEO-MOU-01/2017\*.

**Mots-Clés:** Keywords: Phosphate, Sedimentology, Disturbed areas, Upper Cretaceous, Paleogene, Sinkholes, Boucraa, Morocco

Intervenant

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: amine.bouwafoud-etu@univh2m.ma

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: moufli@yahoo.fr

## Evidence of an Early Cretaceous hydrothermal event in the Middle Jurassic Limestones of the Paris Basin

Benjamin Brigaud <sup>\*1</sup>, Magali Bonifacie <sup>2</sup>, Maurice Pagel <sup>1</sup>, Damien Calmels <sup>2</sup>, Philippe Landrein <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Paris Sud (GEOPS) – Université Paris-Sud - Paris 11, CNRS- UMR8148 – France

<sup>2</sup> Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) – IPGP, 1 rue Jussieu, 75238 Paris cedex 05, France

<sup>3</sup> Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) – Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs – France

In sedimentary basins, the precise temperature in shallow buried rocks (< 60°C) are poorly recorded by classic geothermometers or low temperature thermochronometers. In the last ten years, thermal history and fluid flow periods in the shallow buried Paris Basin have been considerably improved. Different diagenetic studies, coupling petrographic observations and isotopic analyses ( $d^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ ) allowed to characterize a main episode of carbonate cementation during the Early Cretaceous, leading to the filling of intergranular space within the Middle Jurassic limestones. On the other hand, the scenarios of fluid flows within a reliable geological history are difficult to reconstruct because of the difficulty in finding calcites with two-phase aqueous fluid inclusions or apatite to obtain (U-Th)/He or fission track ages. These scenarios strongly depend on the interpretation of  $d^{18}\text{O}_{\text{carb}}$  data that rely on strong working hypotheses on either the temperature or the oxygen isotopic composition of the mineralizing fluid ( $d^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$ ). Consequently, geological interpretations on the same calcite cements, filling inter-granular porespace or fissural porosity, can be diametrically opposed depending on the assumptions made. This demonstrates that temperature constitutes an important lock of diagenetical studies. The aim of this work is to independently reconstruct the (1) temperature and (2)  $d^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$  from calcite crystals of the Paris Basin. In order to answer this question, a diagenetic study was carried out using (1) classical methods (paragenetic association, stable isotopes) and (2) the recently developed D47 geothermometer.

The D47 temperatures of the 2 main blocky calcites indicate temperatures of 60°C and 85°C. The thermal history of the eastern Paris Basin, compiled from organic matter, clay minerals and apatite fission track data indicates that the D47 temperatures in calcite are about 20°C to 45°C higher than the temperature recorded in sediments during the Early Cretaceous. After ruling out the hypothesis of D47 resetting, we suggest that D47 temperatures recorded in these carbonatecements reflect a short hydrothermal event, probably too short to be recorded by organic matter or clay minerals. The  $d^{18}\text{O}_{\text{fluids}}$  vary from + 2.5 ‰ to + 8 ‰ (vs SMOW), implying deep ascendant hydrothermal brine circulations. The high  $d^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$  at the origin of calcite might result from (1) fluids interacting at high temperature with minerals of a crystalline basement or (2) a mixture between hydrothermal fluids and fluids having dissolved a large amount of carbonates.

**Mots-Clés:** Delta47, Paris Basin, Carbonate

<sup>\*</sup>Intervenant

## Upper stability limit of authigenic monazite in the Rocroi Inlier

Corentin Cobert <sup>\*ψ1</sup>, Jean-Marc Baele <sup>1</sup>, Sophie Decrée <sup>2</sup>, Olivier Beyssac <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Mons, Géologie Fondamentale et Appliquée (UMONS) – Belgique

<sup>2</sup> Institut royal des Sciences naturelles de Belgique – Rue Vautier, 13 1000 Bruxelles, Belgique

<sup>3</sup> Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie (IMPMC) – Sorbonne Université UPMC  
Paris VI, CNRS : UMR7590, Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) – France

Authigenic monazite is a Rare Earth Elements (REE) orthophosphate, which is Eu-rich and Th-poor. This mineral is believed to form under late diagenesis to very low metamorphism conditions (>250°C and P~2-10 kbar) in Ca-poor and organic matter-rich shales. Investigation on the potential economical interest of authigenic monazite is motivated by its worldwide distribution and the occurrence of secondary concentration in (paleo-)placer. In Belgium, authigenic monazite has been reported in Lower Paleozoic rocks, including in the Rocroi inlier.

In the Rocroi inlier, dark monazite source rocks are shales of the Revin Group (middle Cambrian to Ordovician). Due to its structure, the Rocroi inlier offers an extensive outcrop of the Revin group. In addition, it is affected by a North to South prograde metamorphism. Therefore, the Rocroi inlier is a good natural laboratory to carry out a petrographical and geochemical study on the behaviour of authigenic monazite during prograde metamorphism.

Cathodoluminescence imaging (CL) and Scanning Electron Microscopy with Energy-Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS) of the Revin Group shales reveal the presence of authigenic monazite in the northern and central part of the Rocroi inlier. At Mairupt (southern part), CL show images of nodules alike authigenic monazite with their typical irradiation haloes around but with different luminescence characteristics inside. SEM-EDS analysis indicate the presence of allanite (LREE-rich epidote), xenotime (HREE-rich phosphate) and LREE, Th-rich monazite assemblages in these nodules. Raman Spectroscopy on Carbon Material showed that the local maximum temperature that was reached by the host rock is 500 ± 50°C, while at Revin and in the "Eau Noire" valley, < 300°C is reported in the literature. A few authors have discussed the conditions for the destabilization of monazite and its transformation into allanite, which occur at 420–450°C. Allanite can later be partially or totally destabilized in metamorphic monazite and xenotime at 550–575°C and > 585°C, respectively, or by retrograde metamorphism. Based on literature data, our results would indicate a breakdown of authigenic monazite at Mairupt and its transformation into allanite.

Therefore, in the Rocroi inlier, the required conditions to form authigenic monazite have been reached and the upper stability limit of this mineral was crossed to the south, which would indicate a minimum temperature of 420°C if we use this limit as a geothermometer.

**Mots-Clés:** Rocroi inlier, Auhtigenic monazite, Cathodoluminescence, Raman spectroscopy of Carbonaceous Material

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: Corentin.COBERT@umons.ac.be

## Evolution sédimentologique et diagénétique des formations jurassiques de la ride de Dehar En Nsour

Mohamed Erragragui <sup>\*ψ1</sup>, Aïssa Masrour, Hicham Benbaqqal

<sup>1</sup> Université de Moulay Ismail (UMI) – Maroc

Les Rides sud-rifaines sont composées par des formations sédimentaires jurassiques qui s'intègrent dans l'histoire de l'évolution de la marge africaine nord-occidentale pendant cette période. Si de nombreux travaux portaient sur leur évolution tectono-sédimentaire, rares sont ceux qui se sont intéressés aux processus diagénétiques. Dans cette étude nous avons levé sur la Ride de Dehar En Nsour huit coupes sédimentologiques pour appréhender l'évolution diagénétique, sédimentologique, bio-stratigraphique et paléo-environnementale de la série sédimentaire du Domérien-Bajocien. Les résultats obtenus montrent que le cortège sédimentaire est composé essentiellement de dépôts carbonatés et marneux regroupés en seize associations faciologiques. De point de vue paléo-environnementale, ces faciès sont déposés dans plusieurs aires de dépôts, comportant essentiellement des milieux de dépôts proximaux très proches du littoral ou des milieux distaux. L'analyse diagénétique des roches carbonatées, nous a permis d'identifier plusieurs phases diagénétiques et de dresser un inventaire des ciments en différenciant les ciments de calcite ou de dolomite, ferrifères ou non ferrifères. Nous avons délimité huit types de ciment de calcite, deux types de ciment de dolomite et un type de ciment d'aragonite. L'histoire diagénétique des dépôts du bassin sédimentaire des Rides correspond généralement à l'évolution ordinaire d'un bassin sédimentaire selon l'ordre : Eo-diagénèse, Méso-diagénèse et phase de soulèvement tectonique responsable de l'exposition météorique de ces dépôts (Télo-diagénèse). D'une manière générale, à partir des phases identifiées on peut suggérer que l'histoire diagénétique de cette région se résume en une séquence diagénétique qui va du milieu marin profond à un milieu continental de soulèvement tectonique.

**Mots-Clés:** Rides sud, rifaines, Carbonates, Paléo-environnement, Jurassique, Diagénèse

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: mohamed.erragragui@edu.umi.ac.ma

## Evolution spatio-temporelle d'une sortie de fluides

Aurélien Gay <sup>\*ψ1</sup>, Michel Lopez <sup>1</sup>, Jean-Luc Potdevin <sup>2</sup>, Valérie Vidal <sup>3</sup>, German Varas <sup>4</sup>,  
Alexiane Favier <sup>5,6</sup>, Nicolas Tribouillard <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de Montpellier (UM) – CNRS : UMR5243 – Place Eugène Bataillon - 34095 Montpellier cedex 5, France

<sup>2</sup> Université de Lille – Laboratoire LOG UMR8187- 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France

<sup>3</sup> Université de Lyon, Laboratoire de Physique, ENS Lyon - CNRS –: UMR5672, France

<sup>4</sup> Instituto de Fisica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV) – Av. Universidad 330, Valparaíso, Chili

<sup>5</sup> Géoazur – Université Côte d'Azur, CNRS, IRD, UMR7329 – France

<sup>6</sup> Université des Antilles - Géosciences Montpellier (GM - UA) – Guadeloupe

Les missions océanographiques sur les sorties de fluides sur le fond des océans ont montré que l'expulsion ne peut être mesurée que localement à l'intérieur même d'un pockmark ou d'un volcan de boue qui peut faire plusieurs centaines de mètres de diamètre. A ce jour, aucune station permanente sous forme d'un laboratoire sous-marin n'a pu être installée pour des raisons évidentes de développement techniques limités par les dimensions de ces objets. Cela limite très fortement l'intégration des processus à l'échelle de la sortie de fluides (évolution spatiale) ou au cours de sa vie (évolution temporelle). L'imagerie géophysique par exemple ne permet d'imager que les structures en fond de mer ou les conduits de migration sous-jacents qui alimentent la zone de sortie de fluides, à une résolution qui ne permet en aucun cas de définir l'architecture interne qui est masquée ou très déformée à cause des anomalies d'amplitude liées aux fluides. L'évolution temporelle et l'architecture interne ne sont donc accessibles qu'à partir de l'analyse d'analogues fossiles. C'est le cas dans le bassin du Sud-est de la France (Beauvoisin) où des bioconstructions et des concrétions carbonatées associées formant des dépressions d'un diamètre de 120 m environ ont été identifiées dans les marnes callovo-oxfordiennes. Cette organisation présente de très fortes similitudes avec le site de Regab dans le Bassin du Congo. Sa formation est issue de la coalescence de plusieurs dépressions circulaires d'une centaine de mètres de diamètre chacune. Seulement une zone est active aujourd'hui, les autres étant mourantes ou éteintes et en cours d'enfouissement.

C'est ce que nous avons également montré à partir d'une analyse stratigraphique fine pour le site fossile de Beauvoisin où une seule dépression est active à un moment donné ce qui semble indiquer que le point d'émission migre latéralement au cours du temps mais reste dans une zone circulaire à sub-circulaire, définissant au bout du compte un pockmark.

Des simulations analogiques récentes d'injection de fluides dans un milieu granulaire ont montré que le point d'expulsion en surface est stable pendant une période de temps (définition d'un cluster) avant de se déplacer latéralement vers une autre zone. Cette périodicité a été également identifiée dans l'évolution stratigraphique du site fossile de Beauvoisin et nous avons montré que les périodes d'expulsion restent stables pendant environ 200 ka et alternent avec des périodes de quiescence d'une durée similaire, le tout pendant près de 3,4 Ma.

Ce type d'analyse est d'une importance fondamentale dans l'évaluation des risques fond de mer car même si une zone de sortie de fluides semble inactive (pas de manifestations sur le fond) cela ne signifie pas qu'elle n'est plus chargée en gaz sous-jacent.

**Mots-Clés:** Pockmarks, fluides

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: aurelien.gay@gm.univ-montp2.fr

## Les paramètres mécaniques à l'origine de la formation des cheminées d'expulsion de fluides dans les bassins sédimentaires

Aurélien Gay <sup>\*1</sup>, Alfredo Taboada <sup>1</sup>, Manon Pochet <sup>1</sup>, Valérie Vidal <sup>2</sup>, Emilien Azema <sup>3</sup>, Frédéric Dubois <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Université de Montpellier (UM) – CNRS : UMR5243 – Place Eugène Bataillon - 34095 Montpellier cedex 5, France

<sup>2</sup> Université de Lyon, Laboratoire de Physique, ENS Lyon - CNRS – UMR5672, Université de Lyon - France

<sup>3</sup> Laboratoire de Mecanique et Genie Civil – University of Montpellier – France

<sup>4</sup> Laboratoire de mécanique et génie civil (LMGC) – CNRS : UMR5508, Université Montpellier II-France

L'exploration systématique des marges continentales a révélé la remobilisation post-dépôt des matériaux par des cheminées de migration de fluides, appelées pipes, qui alimentent des zones d'expulsion sur le fond de la mer comme les pockmarks (fluides seuls), les volcans de boue (fluides+boue) ou les injectites (fluides+sable). A ce jour, les cheminées sont identifiées essentiellement grâce à la sismique 2D/3D sous forme d'empilements verticaux d'anomalies de forte amplitude qui traduisent la présence de fluides qui remontent la colonne sédimentaire en suivant des chemins de forte perméabilité comme des réseaux de fractures. Indirectement cela induit l'idée que ces conduits fonctionnent comme des tubes ouverts à travers lesquels les fluides circulent à des vitesses souvent largement surévaluées. Pour des raisons évidentes de risque ces cheminées n'ont jamais été forées jusqu'à présent et encore moins monitorées. En l'absence de mesures in-situ il est très difficile de comprendre comment ces cheminées fonctionnent, quel est le régime de pression à l'intérieur ni quelle est la cinétiques chimique des échanges avec l'encaissant.

Pour répondre à ces questions, un des moyens à notre disposition est d'utiliser une approche couplant des expériences analogiques et numériques. L'objectif est d'essayer de reproduire la formation de ces cheminées dans des systèmes où les paramètres physiques sont connus, afin de quantifier les mécanismes à l'origine de leur formation. Les simulations numériques permettent de modéliser l'injection ponctuelle d'un fluide à la base et au centre d'une couche granulaire homogène polydisperse immergée dans le même fluide. Les expériences analogiques consistent en une injection ponctuelle d'eau à la base d'une couche de granulaire constituée de billes de verre sphériques polydispersées immergées dans de l'eau.

Les premiers résultats montrent qu'une cheminée de migration se développe en 4 étapes: 1) formation d'un dôme à la surface (régime de surpression et fluidisation), 2) collapse avec formation d'une dépression mais cheminée chargée en fluide, 3) Réduction de la cheminée en profondeur et diffusion, 4) Mort de la structure. Ainsi, le paramètre principal identifié semble être le débit, ou plutôt la vitesse d'ascension du fluide à travers la matrice granulaire. Il y a donc bien une relation entre la vitesse du fluide (i.e. le volume total présent dans le système) et les morphologies observées sur le fond.

Ce type d'approche est absolument indispensable pour définir l'état d'une sortie de fluides et donc définir à quel stade de son évolution elle se trouve lorsqu'elle est observée. En raison des quantités de fluides impliqués, en particulier du gaz, une analyse fine permettrait de définir également le risque qu'elles représentent en particulier pour les installations anthropiques sur le fond de la mer.

**Mots-Clés:** cheminées de migration, pockmarks, modélisation

## Evolution des environnements de dépôt en baie de Concarneau : de l'estuaire à la mise en place des pockmarks

Gwendoline Grégoire <sup>\*1,2</sup>, Anne Murat <sup>1,2</sup>, Agnès Baltzer <sup>3</sup>, Patrick Guyomard <sup>4</sup>, Elodie Marches <sup>4</sup>,  
Axel Ehrhold <sup>5</sup>, Isabelle Poirier <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences et Techniques de la Mer – Conservatoire National des Arts et Métiers [CNAM] – France

<sup>2</sup> Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg – Université de Caen Normandie : EA4253 – Fr

<sup>3</sup> Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique – CNRS : UMR6554, Université de Nantes –France

<sup>4</sup> Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) – Ministère de la Défense – France

<sup>5</sup> Laboratoire Géodynamique et Enregistrement Sédimentaire – IFREMER – Plouzané, France

La baie de Concarneau est connue depuis 2003, comme une zone d'expulsion de fluides à l'origine de la formation d'un champ de pockmarks associé à un écosystème particulier (dominé par les *Haploops* sp.). De précédentes études avaient permis de mettre en évidence le paléo-réseau fluvial, l'architecture des dépôts sédimentaires post-glaciaires et la présence d'un masque de gaz (Menier et al., 2014 ; Baltzer et al., 2017). Afin d'apporter une vérité sédimentaire de l'influence des remontées de fluides sur les dépôts, deux carottages kullenberg ont été effectués par le SHOM. Les premières analyses de géochimie élémentaire (fluorescence X et COT) servent de base à une interprétation préliminaire.

La partie inférieure des carottes présente deux épisodes riches en calcium et pauvres en COT. Interprétés comme des niveaux coquilliers, ces dépôts peuvent être considérés comme le reflet d'environnements à fort hydrodynamisme. Entre ces deux épisodes s'est déposé un niveau riche en rubidium marquant un épisode fin et détritique qui témoigne d'une diminution de l'énergie du milieu. La partie supérieure des carottes se caractérise par un enrichissement, suivi d'une stabilisation, concomitants en rubidium et COT. Cet affinement peut être interprété comme une réduction de l'hydrodynamisme.

En comparant ces résultats aux différentes étapes de la dernière transgression marine (Menier et al., 2014), la partie inférieure des carottes peut être interprétée comme un environnement estuaire. Dominée par la marée, son évolution est gérée par l'ouverture de passes successives fonction de l'augmentation du niveau marin. A la fin de la stabilisation du niveau marin, des sédiments plus fins se sont déposés, scellant ainsi l'ensemble du remplissage.

Ces objets d'étude ont l'intérêt dans le cadre de la thématique fluide : (1) d'avoir enregistré la mise en place du système Pockmarks/Haploops, dont la date reste à déterminer ; (2) d'avoir atteint les niveaux grossiers, qui sont potentiellement les réservoirs secondaires de méthane, à partir desquels s'effectuent les échappements de fluides, lors de ruptures de la couche superficielle, à l'origine de la formation des pockmarks.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre des laboratoires (le "Groupe Concarneau" : SHOM, IFREMER, Université de Nantes et Cnam-Intechmer) qui mutualisent leurs compétences pour réaliser une étude pluridisciplinaire sur la thématique de ces échappements de fluides.

**Mots-Clés:** couverture sédimentaire, réservoir de gaz, émission de fluides, pockmarks

\*Intervenant

## Origine de la dolomitisation et évolution diagénétique de la plateforme carbonatée de Kruja du Crétacé supérieur, Albanie centrale

Jihad Hamd <sup>\*¶2,1</sup>, Adrian Cerepi <sup>1</sup>, Rudy Swennen <sup>2</sup>, Corinne Loisy <sup>1</sup>

<sup>2</sup> K. University of Leuven, Celestijnenlaan 200C, B-3001 Leuven-Heverlee, Belgium – Belgique

<sup>1</sup> EA 4592, Georesources et Environnement, ENSEGID-Bordeaux INP- 1, allée Daguerre, 33607, Pessac, cedex, France  
– Université Michel de Montaigne - Bordeaux III – France

L'objectif de ces recherches est la compréhension des processus de la dolomitisation affectant la succession stratigraphique de la plateforme carbonatée de Kruja datant du Crétacé supérieur ainsi que son évolution diagénétique à partir d'affleurements localisés dans le centre de l'Albanie. 70 échantillons ont été étudiés en pétrographie (classique, cathodoluminescence et pétrographie par fluorescence) et en géochimique (éléments traces, XRD, XRF et isotopes stables du carbone et de l'oxygène). 18 phases diagénétiques dont au moins 9 textures de dolomite ont été identifiées et formées dans des conditions différentes : en diagenèse précoce par évaporation de type sebkha, en diagenèse tardive en enfouissement peu profond ou très profond, ou encore, liées à la migration des hydrocarbures. La dolomite ferreuse et les ciments calcitiques sont très abondants dans la succession étudiée, bien que la dolomite non ferreuse soit également présente. Les premiers ciments calcitiques sont des ciments marins de calcite magnésienne et des ciments micritiques qui obstruent une certaine porosité primaire. Les cristaux rhomboédriques dolomitiques remplacent sélectivement la matrice micritique dans tous les faciès à boue carbonatée et sont interprétés comme un produit d'enfouissement peu profond. La dolomie grossière, avec des cristaux de 200 à 500 mm, n'est pas sélective vis-à-vis des textures et oblitère complètement les textures des séries sédimentaires. Cette dolomie est un produit d'enfouissement profond qui augmente considérablement la porosité secondaire intercristalline. La dolomitisation précoce a été reconnue dans la partie supérieure de la succession, dans des séquences péritidales centimétriques, où les carbonates péritidaux riches en tapis microbien sont remplacés par une dolomite microcristalline. Les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  vont de -2,45 ‰ à 1,07 ‰, indiquant une dolomitisation à basse température avec une origine évaporatoire, bien qu'une certaine recristallisation dans des conditions d'enfouissement peu profondes soit probable. La présence de cristaux non luminescents de dolomite dans la matrice micritique suggère des conditions hypersalines marines peu profondes qui ont induit les processus de cristallisation et la formation des dolomites précoce. Les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  (-12,4 ‰ à -6 ‰ VPDB) et  $\delta^{13}\text{C}$  (-7,5 ‰ à -4 ‰ VPDB) de certains ciments calcitiques tardifs sont typiques pour les ciments provenant de sources mixtes de carbonate organique et inorganique probablement liées aux fluides d'hydrocarbures.

**Mots-Clés:** Plateforme carbonatée de Kruja, diagenèse, dolomite, Albanie

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>¶</sup>Auteur correspondant: jihad.farag.hamd@gmail.Com

## Évolution tectono-sédimento-diagénétique de réservoirs carbonatés du système de transition "plateforme-bassin Ionien" au Crétacé supérieur, en Albanie

Jihad Hamd \*<sup>1,2</sup>, Adrian Cerepi <sup>1</sup>, Rudy Swennen <sup>2</sup>, Corinne Loisy <sup>1</sup>

<sup>1</sup> EA 4592, Georessources et Environnement, ENSEGID-Bordeaux INP- 1, allée Daguin, 33607, Pessac, cedex, France  
– Université Michel de Montaigne - Bordeaux III - France

<sup>2</sup> K. University of Leuven, Celestijnenlaan 200C, B-3001 Leuven-Heverlee, Belgium – Belgique

L'objectif de cette étude est de reconstituer l'évolution tectono-sédimentaire du système carbonaté "plateforme-bassin Ionien" au Crétacé supérieur en Albanie, et aussi d'évaluer les intervalles réservoirs de ce système. Les affleurements étudiés constituent des analogues terrains de réservoirs carbonatés exploités dans la région péri-adriatique. Six types de séquences pérétidales à haute fréquence (5ème à 4ème ordre) ont été reconnues dans la succession stratigraphique de la plateforme carbonatée de Kruja, indiquant une stabilité relative du système de dépôt. Pendant la période du Santonien-Campanien supérieur, la plate-forme a enregistré des environnements subtidaux à intertidaux caractérisés par des faciès à rudistes formant des cycles du 4ème ordre avec des faciès de packstone et de floatstone reflétant les conditions maximales de développement des rudistes. La période du Campanien-Maastrichtien est caractérisée par un changement majeur de la sédimentation marqué par des faciès de packstone slumped intercalés avec des faciès stromatolithiques marquant une période de déstabilisation sur la plate-forme. Cela limite les faciès algo-bactériens du Maastrichtien inférieur qui forment des séquences émersives ou subémersives. Le sommet de la succession reflète le contexte régressif de la plateforme pendant le Maastrichtien. Les mesures pétrophysiques ont révélé une augmentation de la porosité au sommet de chaque séquence émersive. Cela reflète la complexité du potentiel réservoir des séries carbonatées étudiées, même à l'échelle centimétrique. Dans l'ouest de la plateforme, les dépôts de pente qui constituent l'anticlinal de Kremenara présentent sur plus de 200 m des séquences de calciturbidite proximale et distale au Campanien. Ces calciturbidites sont intercalées par des intervalles métriques de débris flow reflétant un apport important de matériaux calciclastiques. Les analyses en pétrographie et de la porosité démontrent que les distributions réelles de porosité sont principalement contrôlées par les caractéristiques sédimentologiques initiales. Dans certains cas, la calcite précoce a réduit l'impact de la compaction et a préservé des pores intercristallins bien développés. Les intervalles Tb, Tc et parfois Td des séquences de Bouma montrent les meilleures valeurs de porosité. De manière inattendue, l'absence de matrice de boue carbonatée a un impact négatif sur les valeurs de porosité, où les grains sont complètement cimentés et une faible porosité intercristalline est notée.

**Mots-Clés:** Plateforme de Kruja, calciturbidites de Kremenara, Albanie, réservoir carbonaté

## \*Intervenant Impact des processus de fossilisation : étude des crustacés exceptionnellement préservés du Jurassique de La Voulte-sur-Rhône

Clement Jauvion <sup>\*1,2</sup>, Sylvain Bernard <sup>2</sup>, Pierre Gueriau <sup>3</sup>, Sylvain Charbonnier <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre de recherche sur la Paléobiodiversité et les Paléoenvironnements (CR2P) – Museum National d’Histoire Naturelle, CNRS: UMR7207, Sorbonne Université UPMC Paris VI – France

<sup>2</sup> Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie (IMPMC) – [IRD] : UR206, CNRS: UMR7590, Museum National d’Histoire Naturelle, Sorbonne Université UPMC Paris VI –PARIS, France

<sup>3</sup> Université de Lausanne (UNIL) – Suisse

Les Konservat-Lagerstätten sont des sites fossilifères livrant des spécimens dits à " préservation exceptionnelle ". Bien que ces sites constituent la source la plus fiable d'informations paléobiologiques, pour un temps et un lieu donné, les processus produisant ces fossiles demeurent mal contraints. Nous avons caractérisé une sélection de crustacés fossiles provenant du Konservat-Lagerstätte jurassique de La Voulte (Ardèche, France), à l'aide d'outils de pointe de la minéralogie : microscopies électroniques, diffraction et spectroscopies par rayonnement synchrotron.

La combinaison de ces techniques nous a permis d'identifier les phases minérales composant les fossiles. Les fossiles préservés en 3D sont composés d'une variété de minéraux (phosphates de calcium, sulfures de fer, de zinc et de plomb, sulfates de magnésium, oxydes de fer et carbonates de calcium et de magnésium) présentant des relations texturales complexes. Les fossiles préservés en 2D sont composés de phosphates de calcium associés à des sulfures de fer.

Les phosphates et les sulfures ont précipité en premier, assurant ainsi la préservation a minima morphologique de structures organiques délicates. Un ciment composé de calcite magnésienne a ensuite consolidé ces structures, assurant la pérennité de la préservation des détails morphologiques fins et labiles. La modélisation d'une telle séquence nous renseigne sur l'évolution des conditions physico-chimiques (pH, pe, concentrations en ions) du site de La Voulte au début de la fossilisation des spécimens étudiés. La dégradation des différents tissus a produit différents microenvironnements physico-chimiques. Ces observations nous permettent de discuter des potentiels biais taphonomiques (quels tissus / organismes ne sont pas préservés et pourquoi) du gisement de La Voulte, et donc de la qualité de cet enregistrement fossile exceptionnel.

**Mots-Clés:** Taphonomie, Konservat, Lagerstätten, Préservation exceptionnelle, Jurassique

\*Intervenant

## Diversity of carbonate systems during the upper Miocene – Origin and significance (Almeria basins, South-East Spain)

Marine Larrey <sup>\*ψ1</sup>, Frederic Mouthereau <sup>1</sup>, Aurélien Virgone <sup>2</sup>, Eric C. Gaucher <sup>2</sup>,  
Veronique Miegebielle <sup>2</sup>, Emmanuel Masini <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – CNRS: UMR5563 – France

<sup>2</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) – France

Onshore basins located in the Almeria Province (Eastern Betics area, Spain) are the result of the collapse of the Betic orogeny leading to the Alboran rifting during the Miocene period. The topographic inheritance infers multi-step and hybrid sedimentary filling. This series starts from a volcano-clastic sedimentation during the Serravallian-Tortonian passing to a carbonate system in the Tortonian-Messinian period. The sedimentary sequence is then ended by a marine Pliocene deposit before more recent Pleistocene-Quaternary sediments.

This overall sequence appears more complex if we observe the Tortonian-Messinian facies distribution (both spatial and stratigraphic). Indeed, carbonates show a great variability of facies including calcarenites, calciturbidites, shells-rich carbonate facies, corals, evaporites, ooids and microbialites, even travertines. Several authors have already investigated the impact of the messinian salinity crisis (MSC) on community changes in relation to sea level fluctuations, which modify the topography as a consequence of an important disconnection between sub-basins (Bourillot et al., 2009, Franseen and Goldstein, 2012). The focal point of our demonstration is that sea level fluctuations cannot explain alone the huge variability concerning carbonate spatial productivity. The stress on biological communities and carbonate producers is highlighted by the coexistence of basin structures which closely interfere with several magmatic events. Water chemistry is also modified by deep basin fluids (CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S-rich fluids), probably related to the nature of the basement including magmatism.

Furthermore, mineralizations are widespread and their relationships with syn- and post-detachment faulting can be inferred. Thus, basin fluid circulation strongly impacts the diagenetic history that appears to be very variable in space and time.

Our workflow is an integrated approach to evaluate the influence of tectono-sedimentary evolution effects and inheritance of the controlling factors on carbonate facies and diagenesis partitioning. Such an assessment may provide valuable keys to unravel basin evolution and predict reservoir and fluid quality in this type of basin in post-orogenic and deep margin settings.

**Mots-Clés:** Partitioning, Carbonates, Diagenesis, Controlling factors, Tortonian, Messinian, Almeria, SE Spain

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: marine.larrey@total.com

## Les failles polygonales affleurantes du bassin de Grenade dans les Caraïbes: signification sur l'état de contraintes de la pile sédimentaire dans un contexte de subduction

Solène Meyer <sup>1</sup>, Crélia Padron <sup>2</sup>, Aurélien Gay <sup>\*1</sup>, Serge Lallemand <sup>1</sup>, Jean-Frédéric Lebrun <sup>3</sup>, Daniel Beaufort <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Geosciences Montpellier (GM) – CNRS : UMR54243, Université Montpellier II – France

<sup>2</sup> Universidad Simón Bolívar, Departamento Ciencias de la Tierra (USB) – Venezuela

<sup>3</sup> UMR Géosciences Montpellier à l'Université des Antilles (GM - UA) – Campus de Fouillole, 97159 Pointe à Pitre, Guadeloupe

<sup>4</sup> INSTITUT DE CHIMIE DES MILIEUX ET MATERIAUX DE POITIERS (IC2MP) – Université de Poitiers, CNRS : UMR7285 – 4 RUE MICHEL BRUNET BAT B27 - CHIMIE 86022 POITIERS CEDEX, France

Lors de la campagne océanographique GARANTI qui a eu lieu en Juin 2017, des polygones géants ont été découverts sur le fond du bassin de Grenade, entre 1800 et 2500 m de bathymétrie, à l'Ouest de l'arc actuel des Antilles. D'une maille moyenne de 2 à 3 km ils sont clairement visibles sur les données bathymétriques et de réflectivité du sondeur multifaisceaux. Sur les profils sismiques correspondants ils représentent le sommet visible sur le fond de la mer d'un intervalle sous-jacent de failles polygonales qui affecte les séries sédimentaires jusqu'à plus de 1000 m de profondeur.

Les failles polygonales ont été reconnues dans de nombreux bassins à travers le monde, comme en mer du Nord, en mer de Norvège, en Australie, sur la marge brésilienne ou sur les marges de l'Ouest Afrique. Quel que soit le mécanisme invoqué pour expliquer leur formation, les auteurs s'accordent pour dire que c'est la contraction de sédiments riches en argiles pendant l'enfoncissement qui provoque la formation de ce réseau polygonal, à la manière des fentes de dessiccation. Il s'agit d'un processus qui conduit à l'expulsion des fluides interstitiels et s'apparente donc à une nouvelle forme de compaction en 3D et non plus en 1D suivant la subsidence. Les analyses d'échantillons prélevés sur le fond montrent justement que ces sédiments sont très riches en argiles, en particulier en smectite, ce qui est cohérent avec la nature des sédiments affectés par cette contraction volumétrique identifiée précédemment dans les autres bassins.

Une analyse fine de l'orientation de ces polygones et de leur organisation dans le bassin de Grenade nous a permis de montrer que leur forme dépend de leur position dans le bassin. Ils possèdent une anisotropie de forme, avec une direction principale qui correspond à l'axe de contraction privilégiée des sédiments argileux. Comme cela a déjà été montré en Mer de Norvège, cette direction suit l'axe de la contrainte effective minimum locale dans la partie superficielle de la colonne sédimentaire. Cette direction tourne progressivement du Nord au Sud de la zone étudiée en suivant la courbure de l'arc actuel des Antilles, ce qui semble suggérer que l'état de contrainte de tout le bassin d'arrière-arc est aujourd'hui contrôlé par les processus de subduction responsables de la formation de l'arc volcanique actuel.

**Mots-Clés:** Failles polygonales, fluides, déformation, subduction

\*Intervenant

## Traceurs géochimiques de l'activité de pockmarks actuels – Application à la baie de Concarneau

Anne Murat <sup>\*ψ1,2</sup>, Agnès Baltzer <sup>3</sup>, Jean-Baptiste Champilou <sup>4</sup>, Gwendoline Gregoire <sup>1,2</sup>,  
Isabelle Poirier <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences et Techniques de la Mer (INTECHMER) – Conservatoire National des Arts et Métiers – France

<sup>2</sup> Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg – Université de Caen Normandie : EA4253 – Fr

<sup>3</sup> Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique – CNRS : UMR6554, Université de Nantes

<sup>4</sup> Bio-Indicateurs Actuels et Fossiles, Université d'Angers – France

La baie de Concarneau est connue depuis 2003, comme une zone d'expulsion de fluides à l'origine de la formation d'un champ de pockmarks associé à un écosystème particulier (dominé par les *Haploops sp.*). La faible profondeur de ce champ (20-38 m) le rend accessible par plongeurs et permet une localisation précise des prélèvements. Seize carottes de 15 à 40 cm ont été prélevées au niveau de deux pockmarks, Alpha et Béta, de même diamètre (10 m) et distants de 300 m. Alpha est profond de 1 m et Béta de 50 cm. Les résultats géochimiques obtenus sur le soufre total (Stot ; fluorescence X ; xSORT) et le Carbone Organique Total (COT ; LECO CS744) montrent que les carottes appartiennent à trois domaines distincts : (1) le domaine externe dominé par l'écosystème à *Haploops sp.* ; (2) le centre d'ordre métrique du pockmark où est située la cheminée et (3) la zone de bordure autour de la cheminée du pockmark qui présente des caractéristiques intermédiaires entre les deux premières. Seul le COT et les deux premières zones sont discutés dans ce résumé. Les 8 carottes prélevées dans le domaine externe présentent la même évolution verticale de COT. Le maximum de COT est en surface (2,5%), puis avec l'enfouissement, le COT diminue (1,5% à 30 cm). Ce gradient correspond à la présence importante en surface de tubes construits par les *Haploops* et de pelotes fécales. Ces structures organo-minérales disparaissent progressivement avec l'enfouissement et leur dégradation par les communautés bactériennes au cours de la diagenèse. Ce premier domaine correspond à des sédiments accumulés progressivement dans un environnement stable sous le contrôle d'une espèce bioingénieur. Les 4 carottes prélevées au niveau des cheminées ne présentent aucune organisation verticale. Le COT est variable (1,8 à 3,0%) mais en moyenne supérieur à celui de la zone à *Haploops* (la moitié des échantillons ont un COT > 2,5%, valeur maximale du domaine externe). Notre hypothèse est que cette désorganisation reflète l'activité de ces pockmarks. Les sédiments récoltés au centre de la dépression ne correspondent ni à l'accumulation progressive du domaine externe ni au remaniement des dépôts de bordure. Ainsi, l'émission périodique de fluides est à l'origine de la désorganisation des sédiments et potentiellement de la mise en suspension de fines particules riches en M.O. provenant de la cheminée qui peuvent alimenter l'écosystème à *Haploops*. Ce travail a été effectué grâce à un financement Action Marges (2016).

**Mots-Clés:** pockmarks, actifs, fluides, COT

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: anne.murat@lecnam.net

## Caractérisation des communautés bactériennes associées au remplissage sédimentaire dans des zones côtières soumises à des échappements de fluides (Baie de Concarneau et du Croisic) par métagénomique

Anne Murat <sup>\*1,2</sup>, Isabelle Poirier <sup>1,2</sup>, Gwendoline Gregoire <sup>1,2</sup>, Marina Moletta-Denat <sup>3,4</sup>, Agnès Baltzer <sup>5</sup>, Jean-Baptiste Champilou <sup>6</sup>, Elodie Marches <sup>7</sup>, Patrick Guyomard <sup>7</sup>, Axel Ehrhold <sup>8</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences et Techniques de la Mer - CNAM - / <sup>2</sup> Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg, Université de Caen Normandie : EA4253 - Fr / <sup>3</sup> INRA Transfert Environnement - Institut National de la Recherche Agronomique / <sup>4</sup> Plateforme Génomique GeT-INRA Transfert - Institut national de la recherche agronomique (INRA) / <sup>5</sup> Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique - CNRS : UMR6554, Université de Nantes - / <sup>6</sup> Bio-Indicateurs Actuels et Fossiles, Université d'Angers - Université d'Angers - / <sup>7</sup> Service Hydrographique et Océnographique de la Marine (SHOM) - Ministère de la Défense - / <sup>8</sup> Laboratoire Géodynamique et enregistrement Sédimentaire - Geosciences Marines (GM-LGS) - IFREMER

Ce travail a d'abord été effectué grâce à des financements Action Marges (2016), puis dans le cadre de la collaboration des laboratoires qui constituent le " Groupe Concarneau " : SHOM, IFREMER, Université de Nantes et Cnam-Intechmer. Le travail présenté correspond à une première analyse métagénomique des communautés bactériennes de sédiments associés à la thématique des sorties de fluides et en particulier des pockmarks. L'ADN génomique total a été extrait à partir de 0,3 g de sédiment grâce au kit d'extraction " DNeasy PowerSoil Kit " (Labo- ratoires Mo Bio, USA). Pour chaque extract, la région variable V4-V5 du gène bactérien codant pour l'ARN ribosomique 16S a été amplifiée par PCR. Les amplicons ont ensuite été séquencés par séquençage haut débit (sequenreur MiSeq (Illumina)) et les séquences présentant au moins 97% d'homologie entre elles ont été regroupées en Unités Taxonomiques Opérationnelles (OTU). Le nombre d'OTU ainsi obtenu permet de rendre compte de la diversité de la communauté bactérienne. Les séquences ont ensuite été analysées par bioinformatique afin de les comparer aux bases de données internationales et d'identifier chaque OTU à différents niveaux taxonomiques : Domaine (Eubacteria et Archaea), Phylum, Classe, Ordre et parfois Genre. Cette méthode permet également de quantifier le nombre de séquences par OTU et donc de connaître le pourcentage que représente chaque groupe taxonomique dans la communauté. Les 24 échantillons utilisés proviennent à la fois de sédiments (1) de surface, prélevés par plongeurs, au niveau de trois pockmarks et des zones adjacentes, dominées par l'écosystème à Haploops sp. (Baies de Concarneau et du Croisic) et (2) de deux carottages Kullenberg (Baie de Concarneau). Pour traiter cette très grande quantité de données, une analyse statistique par ACP a été utilisée. Les résultats montrent une différenciation claire de la zonation redox qui s'établit au cours de la diagenèse avec l'enfoncement : zone aérobie, zone de sulfato-réduction, zone de transition sulfates-méthane (SMTZ) et zone méthane. Les sédiments de la zone méthane étant très pauvres en matière organique, le gaz présent (masque sismique) pourrait provenir également de zones plus profondes. La cheminée du pockmark, actif le plus récemment, présente une communauté bactérienne particulièrement abondante (jusqu'à 42737 séquences à 5 cm de profondeur), diversifiée (jusqu'à 3696 OTU et un indice de Shannon de 6.4 à 5 cm de profondeur) et singulière.

**Mots-Clés:** Métagénomique, sédiments côtiers, communautés bactériennes, diagenèse, fluides, pock- marks

## Characteristics and diagenesis of volcanic ash beds from the Vaca Muerta Formation, Neuquén Basin, Argentina

Philippe Rutman <sup>\*1</sup>, Alain Lejay <sup>2</sup>, Guilhem Hoareau <sup>3</sup>, Jean-Michel Kluska <sup>2</sup>,  
Eider Hernandez Bilbao <sup>4</sup>, Frabçois Gelin <sup>2</sup>, Charles Aubourg <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA) - IPRA, TOTAL, CSTJF, Pau - France

<sup>2</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) - TOTAL, CSTJF, Pau - France

<sup>3</sup> Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA) - IPRA - France

<sup>4</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) - IPRA - France

Volcanic activity is known to play a role in the organic matter production found within source rocks. As many other petroleum source rocks in the world, the Vaca Muerta Fm (Tithonian-Vallanginian, Neuquén basin) has recorded this volcanic activity through numerous centimetric thick ash beds (up to 4 per metre). These ash beds are important to study because of their potential role in the propagation of hydraulic fractures in unconventional oil/gas shale production and their role as fluid carrier beds during diagenesis and early primary oil migration. An exhaustive study of these ash beds, based on petrophysical, mineralogical and geochemical approaches on cores, was thus carried out (Optic microscopy, MEB-QUANTAX, EDS, DRX). Two main families of ash beds were recognized. The first family, the clay-rich ashes, is characterized by a matrix made of an illite/smectite assemblage (20-70%) with mainly albite phenocrystals locally altered into calcite. It may correspond to a first phase of ash ejection, where ashes made of microlithes and volcanic glass were transported over relatively short distances and extensively altered (volcanic glass illitization). The second family, the calcite cemented ashes, is characterized by argilitized glass shards, pumice fragments and vesicle particles (10-20%) associated with mineral fragments supported by a calcitic matrix (50-75%). It may correspond to a second phase of ash ejection, where lighter and more vesicularized ashes were ejected and transported further away, before being calcite-cemented during early burial diagenesis. Normal sorting during ash decantation on the sea floor resulted in the cemented ashes commonly overlying the clay ashes. A trace elements study enabled to confirm the origin of the associated volcanic series, i.e. calco-alkaline with andesites and rhyodacites in an andesian back arc setting.

**Mots-Clés:** Neuquén Basin, Vaca Muerta, Diagenesis, Ash beds

<sup>\*</sup>Intervenant

## Genèse des corps dolomitiques réservoirs au sein de la plateforme carbonatée du Jurassique supérieur des Causses Méjean (SE de la France).

Hamza Salem Bobaker Al Matoni <sup>\*1,2</sup>, Hamza AL MATONI<sup>2</sup>, Corinne LOISY<sup>1</sup>, Adrian CEREPI<sup>1</sup>,  
Rudy SWENNEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Corinne LOISY – 1, EA 4592 – ENSEGID-Bordeaux INP – 1, allée Daguin, 33607, Pessac, cedex, France ; - France

<sup>2</sup>Université catholique de Louvain, Celestijnenlaan 200C, B-3001 Louvain-La-Neuve, Belgique

L'objectif de ces recherches est de comprendre l'influence des différents facteurs sédimentaires, diagénétiques, tectoniques et paléohydrogéologiques dans la formation des grands ensembles dolomitiques - réservoirs de la plate-forme oxfordo-portlandienne des Causses Méjean et leurs implications sur l'hétérogénéité en 3D des corps dolomitiques-réservoirs. Les corps dolomitiques, plus ou moins stratiformes et d'orientation générale nord-sud, ont une extension de 5 à 30 km et 300 m d'épaisseur. Ils se développent en fonction des séquences sédimentaires identifiées dans un contexte connu de plate-forme de type rampe carbonatée caractérisée par divers faciès sédimentaires allant des environnements distaux aux environnements proximaux: rampe intérieure (lagune), rampe médiane (bancs) et rampe externe.

Deux coupes des Bastides et des Tripiers ont été plus particulièrement étudiées et montrent des faciès peu profonds de plate-forme interne à faciès de transition interne-externe. Elles ont été affectées par des processus de dolomitisation précoce mais aussi parfois de diagenèse tardive. En revanche, la zone de Meyrueis (faciès de plate-forme externe) montre une dolomitisation tardive sous forme de lentilles résultant de circulation de fluide le long des accidents tectoniques majeurs.

L'ensemble de ces faciès ont été plus ou moins affectés par la dolomitisation. Les textures des corps dolomitiques présentent cinq types de textures basés sur l'organisation, la taille des cristaux (basé sur le modèle d'Adabi, M.H. (2009)), la forme (anhédral, euhédral ou subhédral), l'homogénéité (équigranulaire ou pas) et les distributions (unimodales ou polymodales), la forme de la bordure des cristaux (planaire ou non), et les structures cristallines (Sibley et Gregg (1987), Mazzullo (1992)). Douze processus diagénétiques ont été observés : phases de néomorphisme, différentes phases de dolomitisation, compaction, dissolution, fracturation, stylolitisation, cimentation et micritisation etc. Une évaluation de l'influence de ces facteurs sur les propriétés réservoirs sera effectuée par la suite dans cette étude.

**Mots-Clés:** Plate forme carbonatée Diagenèse, Dolomitisation, sédimentologie, Tectonique

\*Intervenant

## Intégration de données multi-échelles pour la caractérisation de réservoirs carbonatés. Le cas de l'Urgonien du Vercors

Audrey Thomas <sup>\*ψ1</sup>, Danièle Grosheny <sup>1</sup>, Fabrice Malartre <sup>1</sup>, Yves Géraud <sup>1</sup>, Serge Ferry <sup>2</sup>,  
Didier Quesne <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Lorraine – GeoRessources, UMR 7359 CNRS-UL – France

<sup>2</sup> 6D avenue Général de Gaulle, 05100 Briançon, France – Université de Lyon – France

<sup>3</sup> Université de Bourgogne – UMR 6282 Biogéosciences – France

Le Barrémo-Bédoulien (Aptien inférieur) est la période de développement maximal de la plate-forme carbonatée urgonienne qui forme l'ossature des chaînes subalpines septentrionales françaises. L'objectif de ce travail est d'analyser les géométries des corps sédimentaires, principalement des calcarénites et les faciès à rudistes du Vercors, de les replacer dans un contexte géodynamique et de déterminer les propriétés réservoirs de ces formations. Les applications sont nombreuses. Elles concernent, pour le Sud Est, la prospection géothermique et le stockage d'énergie, et représentent un analogue pour d'autres régions du monde.

Pour établir et contraindre un tel modèle, il est nécessaire d'intégrer des objets géologiques multi-échelles. La falaise orientale du massif du Vercors est un affleurement exceptionnel, de plusieurs centaines de mètres de hauteur et continu latéralement sur plusieurs kilomètres, qui offre la possibilité de suivre les transitions latérales de faciès et reconnaître les réseaux de failles et fractures. Cette étude propose de combiner des corrélations de coupes séries, à l'observation et l'interprétation systématique des microfaciès. La majorité de ces échantillons sont des packstones et grainstones à foraminifères (notamment des orbitolines et des milioles) et bioclastes (rudistes, échinodermes, bryozoaires, dasycladales, etc). Les orbitolines et les ammonites permettent de caler biostratigraphiquement les coupes.

Les mesures pétrophysiques réalisées sont les suivantes : vitesse de propagation des ondes (P et S), mesure de conductivité thermique, mesure de densité et porosité des matériaux (triple mesure de porosité à l'eau, à l'hélium, au mercure) ainsi que les mesures de perméabilité matricielle à l'azote. Les vitesses de propagation des ondes P varient entre 4082 m.s<sup>-1</sup> et 6410 m.s<sup>-1</sup> pour une moyenne de 5466 m.s<sup>-1</sup>. La porosité à l'eau ne dépasse pas les 6%. Les valeurs de perméabilité sont inférieures à 2 mD. Les variations importantes des vitesses associées aux faibles valeurs de porosité montrent que la fissuration est le facteur dominant le signal géophysique. Ces caractéristiques, mises en regard avec une analyse pétrographique précise des faciès carbonatés (une centaine de lames minces par coupe) permettra d'établir des associations de microfaciès.

**Mots-Clés:** Barrémien Aptien, Sud Est France, Plate forme carbonatée, Potentiel réservoir, Sédimantologie

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: audrey.thomas@univ-lorraine.fr

## Origin and spatial distribution of clay coatings in estuarine deposits: Comparisons between a modern analogue (Gironde estuary, France) and deep sandstone reservoirs (Bonaparte Basin, Permian).

Maxime Virolle <sup>\*1</sup>, Benjamin Brigaud <sup>1</sup>, Sylvain Luby, Hugues Feniès <sup>2</sup>, Raphaël Bourillot <sup>2</sup>,  
Eric Portier <sup>3</sup>, Julius Nouet <sup>1</sup>, Patricia Patrier <sup>4</sup>, Daniel Beaufort <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Paris Sud (GEOPS) – Université Paris-Sud - Paris 11, CNRS: UMR8148 – Université Paris Sud, bât. 504  
510, 91405 ORSAY Cedex, France

<sup>2</sup> ENSEGID, Géoressources et Environnement – Bordeaux INP – 1 Allée Daguin, 33607 Pessac, France, France

<sup>3</sup> GDF-Suez, Direction EP – GDF-Suez – 1 place Samuel de Champlain, 92930 Paris la Défense Cedex, France

<sup>4</sup> Université de Poitiers – CNRS : UMR7285 – France

<sup>5</sup> INSTITUT DE CHIMIE DES MILIEUX ET MATERIAUX DE POITIERS (IC2MP) – Université de Poitiers,  
CNRS : UMR7285 – 4 RUE MICHEL BRUNET BAT B27 - CHIMIE 86022 POITIERS CEDEX, France

The development of clay (mainly chlorite) coatings around detrital quartz can be a major factor controlling reservoir quality in deeply buried sandstone reservoirs (> 3500 m). These coatings prevent quartz overgrowth and thus preserve porosity and permeability during burial. Although the link between clay coatings and good porosity has been established in a number of ancient estuarine sandstone reservoirs (e.g. North Sea, Bonaparte Basin...), questions remain about their initiation (sedimentary, diagenetic), the factors controlling their evolution and the prediction of their spatial distribution. Answering these questions would reduce the uncertainty associated with the exploration of such reservoirs, for deep hydrocarbons or geothermal purposes. The method consists in the comparison of estuarine facies and petrography by investigating a deep sandstone formation (offshore Australia, Bonaparte Basin) and a modern analogue (the Gironde estuary). The objective is to better predict the spatial distribution of well-preserved reservoirs properties within deeply buried sandstone reservoir. Relationships between the development of detrital clay grain coats, the sedimentary characteristics (facies, geobody types, grain size, clay mineralogy...) and reservoir properties will be established.

Cores descriptions allow to determine similar facies between both environments. Petrographic and mineralogical experiments on 38 samples from Bonaparte basin and almost 400 samples from the Gironde were realized. On Bonaparte basin samples, clay coatings (mainly composed of chlorite, illite and mixed-layer clay minerals) are observed around sand grains. Samples from the Gironde show the presence of detrital coats mainly composed of clay minerals associated with diatoms, silt-size grains, and coccoliths. Coats are partially developed on most grains (10-30 % of sand grains surface) forming various textures. They are formed during sand grains deposits and preferentially in the inner part of the estuary (from the Bay Head Delta to estuarine channels). In the Bonaparte basin (3500 m depth), observations of aggregates located around sand grains could be precursors relic which formation could be syn-sedimentary. After mechanical compaction or at the beginning of chemical compaction, transformations of those aggregates may allow the formation of continuous chlorite coatings around quartz grains. Thus, paleo-Bay Head Delta must be found in ancient sandstone during reservoir exploration.

**Mots-Clés:** Coatings, Estuary, Reservoirs, Diagenesis, Comparisons

<sup>\*</sup>Intervenant

## **1.7. La Craie, de la sédimentologie, à la fracturation et aux propriétés mécaniques ou de réservoir**

## Non-tectonic precoce deformations in chalk

Cécile Allanic <sup>\*1</sup>, Eric Lasseur <sup>1</sup>, Ophélie Faÿ-Gomord <sup>2</sup>, Bertrand Gauthier <sup>3</sup>, Michaël Verbiest<sup>2</sup>,  
Rudy Swennen <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

<sup>2</sup> KU Leuven – Division of Geology, Celestijnenlaan 200E, B-3001 Leuven-Heverlee, Belgique

<sup>3</sup> TOTAL S.A. – France

Chalk is a fine-grained carbonate rock characterized by a range of porosities of 5 to 20% and low permeabilities of up to 0.001 mD, which can act either as a reservoir or as a seal formation. Because of its low permeability, understanding the fracture network is crucial for the fluid flow prediction or the integrity of a tight chalk caprock. Indeed, once fractured, the chalk can develop significant amounts of fracture porosity and thus become very permeable. The prediction of the fracturation patterns require an understanding of the system, both temporally and genetically, of the different fracturing states, including very precoce (i.e. synsedimentary), non-tectonic deformations.

Thus, this study summarizes the structural observations realized on analogues reservoirs to those of North Sea, in the Cretaceous chalk formations of the Anglo-Parisian basin: 1- in Yorkshire (United Kingdom) and 2- in Normandy (France). On these two sites, we have been able to highlight the presence of polygonal fractures network confined in certain stratigraphic levels (Campanian in Yorkshire and Upper Turonian in Normandy). These dense networks of multidirectional normal faults are synsedimentary (probably due to differential compaction) in a tectonic context where horizontal stresses are isotropic ( $s_2=s_3$ ). In the literature, their radial orientations have often led to misinterpretations considering them as the result of polyphased tectonic phases. These early fractures do not appear as major drains initially. On the other hand, they are preferentially reactivated during successive tectonic events which can then localize intense circulations of fluids thus letting in connection several superimposed aquifers. Finally, in Normandy, unique precoce fracturation patterns have been evidenced linked to the asymmetrical geometries of sediment wave contourites (and associated facies). We interpret the latter as the result of collapse structures related to the release of overpressures developed in some facies.

Acknowledgements: The authors thank TOTAL SA and TOTAL UK for funding this study and authorizing the results to be published.

**Mots-Clés:** Chalk, Polygonal Fracture System, Collapse structures, sediment wave contourites

<sup>\*</sup>Intervenant

## Pétrologie, géochimie et pétrophysique de la craie de construction médiévale de l'Haute Normandie (France): résultats préliminaires

Daniel Ballesteros <sup>\*1</sup>, Damase Mouralis <sup>1</sup>, Carole Nehme <sup>2</sup>, Aude Painchault , Dominique Todisco <sup>2</sup>, Mariacristina Varano

<sup>1</sup> IDEES – Normandie Univ, UNIROUEN, CNRS : UMR6266 – 7 rue Thomas Becket, 76130 Mont-Saint-Aignan, France

<sup>2</sup> Identités et Différenciations des Espaces, de l'Environnement et des Sociétés (IDEES) – Université de Rouen, CNRS UMR6266 – France

La craie occupe 5% de la surface d'Europe et cette roche a été rarement utilisée comme pierre de construction du continent en comparaison avec d'autres matériaux, comme les roches magmatiques, les grès et les autres calcaires. Cependant, en Normandie orientale, la craie a été la principale pierre utilisée, entre autres, pour la construction d'édifices religieux ou de châteaux entre les X et XIV<sup>e</sup> siècles. Cette roche a été extraite sur plus de 15 km de carrières souterraines à Caumont, Vernon et autres localisées principalement dans la partie amont du bassin de la Seine. Ce fleuve a été voie de communication principale pour acheminer les pierres de taille. Cependant, les caractéristiques et l'identification des lieux d'extraction des pierres de chaque bâtiment sont encore peu connues. Pour cette raison, le projet ATP (archéomatériaux, territoire, patrimoine) vise à caractériser la craie utilisée en Normandie orientale comme pierre de taille médiévale et à établir l'origine de son extraction, avec l'objectif de définir le fonctionnement et la structure du territoire durant le Moyen-Âge. La méthodologie de travail comprend : i) la constitution d'une base de données sur les bâtiments médiévaux à partir de la documentation historique et archéologique et ii) l'analyse pétrologique, minéralogique, géochimique et pétrophysique de la craie des bâtiments, des carrières souterraines et des affleurements rocheux. La stratigraphie des principales carrières est également définie, avec l'aide d'un scan laser terrestre Faro M70. Les résultats préliminaires indiquent que la principale pierre à bâtir utilisée est la craie blanche pure mudstone, wacke à packstone, échinodermes et bivalves, et la craie blanchâtre-jaunâtre packstone à bryozoaires. Ces deux types de craies sont issus probablement du Turonien au Campanien (Crétacé Supérieur). Ces craies correspondent principalement aux litho-types micritiques et granuleux, et incluent des nodules de silex abondants et dispersés.

**Mots-Clés:** craie, pétrologie, géochimie, pétrophysique, pierre à bâti

<sup>\*</sup>Intervenant

## Comportement de la craie sous la circulation de fluides à températures contrastées

Thomas Junique <sup>\*ψ1</sup>, Patricia Vazquez <sup>1</sup>, Céline Thomachot-Schneider <sup>1</sup>, Yves Géraud <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Groupe d'Étude sur les Géomatériaux et Environnements Naturels, Anthropiques et Archéologiques - EA 3795 (GEGENAA) – Université de Reims Champagne-Ardenne : EA3795 – France

<sup>2</sup> GeoRessources – Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7359 – France

Le comportement des roches soumises à une circulation de fluides peut être influencé par la nature de la sollicitation appliquée, la structure de la roche et la nature du fluide injecté.

Dans cette étude, des expériences de circulation de fluides à des températures contrastées (roche froide - eau chaude // roche chaude - eau froide) ont été réalisées afin de caractériser la variation microtexturale de la craie, composante majoritaire de la croûte supérieure de la Champagne-Ardenne (région en développement d'énergie géothermique et méthodes de stockage).

La craie étudiée provient des carrières du Grand Mont (Saint-Germain-la-Ville). Des éprouvettes cylindriques ( $H = 20\text{mm}$  ;  $\phi = 16\text{mm}$ ) ont fait l'objet d'une caractérisation pétrographique et pétrophysique. Un ensemble de 120 échantillons statistiquement homogènes a été testé dans 4 dispositifs afin de produire une circulation de fluides : i) 10 L d'eau en équilibre chimique avec la craie ont circulé dans des échantillons témoins (sans contrainte thermique) grâce à la conception d'un perméamètre à charge constante ; ii) 25 essais d'imbibition capillaire ont été effectués sur des craies chauffées à  $80^\circ\text{C}$  ou à température ambiante, avec une eau à  $8^\circ\text{C}$  ou à  $80^\circ\text{C}$  ; iii) un transfert continu d'eau (10 L) à  $80^\circ\text{C}$  ou à température ambiante a été réalisé grâce à un dispositif utilisant l'appel d'air exercé par des dessicateurs mis sous vide ; iv) des tests d'endommagement par choc thermique ont été obtenus par une trempe des échantillons à  $80^\circ\text{C}$  dans de l'eau à  $0^\circ\text{C}$ . Le degré de dissolution de la calcite pouvant être influencé par les différences de température entre le fluide d'injection et la roche, l'évolution du réseau poreux a été quantifiée à l'échelle du grain après chaque expérience. L'évolution des propriétés du réseau poreux a été analysée par imbibition capillaire, MEB, porosimétrie mercure, RMN, perméamétrie et auscultation ultrasonique. Les solutions issues des différentes interactions fluide-roche ont été analysées par ICPAES.

L'ensemble des données ont été corrélées afin de suivre l'évolution du réseau poreux. Il apparaît que l'écoulement permanent d'eau (chaude ou froide) à travers la craie provoque un réarrangement du réseau poreux significatif et continu, qui s'observe par la variation de l'imbibition capillaire. Les observations faites à l'échelle du grain montrent des modifications de la forme et de la taille des pores, elles ont un impact sur les propriétés mécaniques et élastiques de la roche.

**Mots-Clés:** Craie, Sollicitation thermique, Interaction fluide/roche, Réseau poreux

Intervenant

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: thomas.junique@univ-reims.fr

## La craie, modes de dépôt, hétérogénéités sédimentaires et diagenèse précoce, conséquence sur les propriétés réservoirs.

Eric Lasseur <sup>\*1</sup>, Jessica Saiag <sup>2</sup>, Ophélie Fay Gomord <sup>3</sup>, Cécile Allanic <sup>1</sup>, Pierre Yves Collin <sup>4</sup>,  
Caline Bruno <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) – 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans, Cedex 2, France, France

<sup>2</sup> Université Bourgogne Franche Comté (UMR CNRS 6282, Biogéosciences) – 6 bd Gabriel 21000 Dijon, France

<sup>3</sup> Katholieke Universiteit Leuven (KUL) – Celestijnlaan 200D, BE-3001 Heverlee, Belgique

<sup>4</sup> Université de Bourgogne - Biogéoscience - DIJON, France

<sup>5</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) – TOTAL -Avenue Larribau 64018 Pau Cedex, France

La Craie a longtemps été considérée comme un sédiment homogène et isotrope, et les variations dans l'espace de ces propriétés réservoirs sont restées peu étudiées à l'exception de certains champs pétroliers. Ces dernières années ont vu le développement d'études visant à mieux comprendre la sédimentologie, l'origine des réseaux de fractures dans la craie, et leurs liens intrinsèques. Elles ont révélé des hétérogénéités importantes tant dans le mode de dépôt, la minéralogie, les microtextures rencontrées que dans la fracturation résultant de stades plus ou moins précoce. Concernant les dépôts sédimentaires, le terme très général de Craie recouvre des modes de sédimentation variés, allant depuis des dépôts de plate-forme peu profonde plus ou moins terrigènes prédominant dans les sédiments Cénomanien, à des dépôts contouritiques résultant d'une circulation thermohaline océanique, voir à des dépôts turbiditiques. Les dépôts crayeux, plus ou moins grossiers en fonction de l'hydrodynamisme, alternent fréquemment avec des périodes d'arrêt ou de ralentissement de la sédimentation qui induisent des hétérogénéités plus ou moins marquées à l'échelle métrique (variation de teneur en insolubles, surface de lithification précoce, bancs de silex) qui forment autant d'hétérogénéités pétrophysiques et mécaniques. Ces dépôts variables ont pour conséquence des géométries sédimentaires très différentes, et une distribution complexe des propriétés pétrophysiques. Les surfaces d'arrêt de sédimentation, lithifiées précocement, forment des hétérogénéités majeures, peu poreuses et perméables, qui compartimentalisent les réservoirs mais ont également un comportement mécanique différent des sédiments environnants qui peut résulter en une fracturation particulière et plus marquée. Nous illustrerons par des exemples de terrain et de susbsurface, les principaux types de géométries et de distribution de faciès sédimentaire connus et discuterons de leur influence sur la distribution des propriétés réservoir dans la craie.

**Mots-Clés:** Sédimentologie, Craie, hétérogénéités, propriétés réservoirs

<sup>\*</sup>Intervenant

## Roughness description and characterisation of major fractures in three different chalks of the North-West European Basin

Marie-Laure Wattier <sup>\*ψ1</sup>, Sara Vandycke <sup>1</sup>, Françoise Bergerat <sup>2</sup>, Fanny Descamps <sup>2</sup>,  
Jean-Pierre Tshibangu <sup>1</sup>

1 Université de Mons (UMons) – 20, place du Parc, B7000 Mons, Belgique

2 Sorbonne Universités – UPMC Univ 06Paris; CNRS – France

Upper Cretaceous chalk in the North-West European basin has been widely studied, notably in the support of human activity such as North Sea hydrocarbons reservoir production, the construction of the underground tunnel under the Channel, and the production in many chalk quarries in the UK, France and Belgium. Depending on their age, depositional environment and lithology, chalk deposits present specific mechanical and petrophysical characteristics, which can vary greatly from one location to another. The basin displays networks of faults and joints resulting from global and regional tectonic events. These structural features directly affect the behaviour of the rock mass, notably in terms of stability. Lab study of the chalk often focus on intact samples or artificially created fractures produced by (Brazilian) tensile test or by shear test, without direct comparison with the natural objects.

A comparative study between natural fractures and lab-generated fractures in chalk is here presented. Chalks from Harmignies in the Mons basin (Belgium), Arras and Cap Blanc Nez (France) were systematically studied with the same process: on-site observation of outcrops, survey of fractures (faults and joints) within the local and regional tectonic context, collection of samples bearing geological features of interest (plumoses, ridges, fault striations...). After observation and initial classification of fracture surfaces, a large amount of scans -249 in total- was conducted with a high-precision laser on those such surfaces. This was done for natural fractures and for several series of lab-generated fractures: for each chalk type, three series of shear tests with different confinement and a series of (Brazilian) tensile test. The 3D topographic reconstructions resulting from scans were then processed to compute roughness indices, by means of statistical parameters (mean asperities height Ra, standard deviation σa, the RMS Z2 parameter) and fractal dimension (yardstick rule and semi-variogram methods). For reference, JRC profiles measurements were also undertaken with steel gauges. Moreover, for each chalk type, UCS and porosity were measured on cylindrical cores.

Preliminary analysis shows that computed roughness for the samples studied is best expressed by Z2 and fractal dimensions, although Dvar occasionally departs from Z2 and Dyard, which follow similar trends. Lab-generated fractures display higher roughness indices than natural fractures. Arras chalk samples distinctively show higher roughness indices than Harmignies or Blanc-Nez chalk.

**Mots-Clés:** Chalk, Roughness, Fracture, Tectonic, Mons, BlancNez, Arras

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: marie-laure.wattier@umons.ac.be



## **2. GEODYNAMIQUE / TECTONIQUE – SYSTEMES OROGENIQUES ET MECANIQUE DE LA LITHOSPHERE**



## 2.1. La chaîne varisque

## Métapéridotite à zircon géant de l'Unité Inférieure des Gneiss près de Brioude, Massif Central

Eric Armynot Du Châtelet <sup>\*1</sup>, François Guillot <sup>†1</sup>, Pierre Lanari <sup>2</sup>, Monique Seyler <sup>1</sup>, Christian Pin <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - CNRS : UMR8187, Université Littoral Côte d'Opale, Univ. Lille – France

<sup>2</sup> Inst. Earth Sciences, Uni. Bern – Suisse

<sup>3</sup> Laboratoire de Géologie, CNRS, Clermont-Ferrand – Université Clermont Auvergne – France

L'Unité Inférieure des Gneiss à l'Ouest de Brioude (Haute-Loire) est une formation plurikilométrique de métapélites. Elle contient des stocks décamétriques de péridotite, disposés en un chapelet égrené à quelques centaines de mètres des formations rattachées à l'Unité Supérieure des Gneiss, dont le Groupe Leptyno-Amphibolique. Parmi ces stocks de péridotite, celui du Peigne du Chazeau (commune de Saint-Beauzire, 43) comprend une veine de pyroxénite à cristaux de zircon centimétriques signalée par Forestier (BSCgF, 1963; BRGM 1964) qui en avait déposé un échantillon au Musée Crozatier du Puy-en-Velay. La tomographie-3D des rayons X (Univ. Lille) a permis d'observer de façon non-destructive la distribution des cristaux de zircon dans ce témoin (étude statistique en cours) et de choisir des plans de section dans un autre échantillon à zircons centimétriques d'une collection privée. Quoique les plus gros soient plutôt à formes arrondies, les petits zircons extraits d'un troisième échantillon possèdent les faces pyramidales {101} et les faces prismatiques {110} suggérant une genèse en milieu agpaïque à température modérée (Pupin, CMP 1980).

Ces zircons ont fourni un âge U-Pb par ablation laser (LA-ICP-MS, Univ. Bern) de  $343 \pm 10$  Ma. Mesurée (Univ. Bilbao) sur des fragments d'un zircon centimétrique, la valeur négative d' $\delta\text{EHf}$  calculé à 345 Ma montre (moy. -2.4; écart-type : 0.4) que le hafnium, et donc selon toute vraisemblance le zirconium, ont évolué pour l'essentiel dans un environnement à rapport Lu/Hf inférieur à celui des chondrites, et a fortiori du manteau appauvri. Ceci exclut une contribution notable d'un réservoir de type manteau appauvri sous-océanique. En accord avec la signature largement crustale du Nd trouvée pour la roche totale, comme avec leur rapport Th/U bas ( $\sim 0,04$ ), ces zircons devraient donc avoir une origine métamorphique. Leurs spectres de terres rares suggèreraient des conditions granulitiques (anomalies en Ce et Eu).

Les observations de plaques minces au MEB-EDS (Univ. Lille) permettent d'apprécier cette empreinte métamorphique varisque. Les métapélites encaissantes contiennent une lentille de gneiss disthène et gahnite. Quoique fortement serpentinisée, la péridotite a conservé des clinopyroxènes, riches en exsolutions, comportant une frange limpide appauvrie en Al qui résulterait d'un effet thermique postérieur au stade magmatique.

Ces données devraient permettre de mieux cerner l'origine et l'histoire de tels paquets de péridotite au sein de métapélites, une question concernant aussi certaines péridotites des Vosges (p. ex. à La Charme, commune de Cleurie, 88). Leur mise en place pourrait se faire en profondeur per descensum, à partir du manteau de la plaque supérieure comme à Almklovdalen (Brueckner, JMG 2018), ou bien en surface, comme olistolithes de manteau exhumé comme cela est proposé pour Herz (Clerc et al., BSgF, 2012).

**Mots-Clés:** zircon géant, péridotite, Unité inférieure des Gneiss

<sup>†</sup>Intervenant

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: Eric.Armynot@univ-lille.fr

## Thrusts or detachments in the inner parts of a mature orogen? insights from the coastal South Armoricain Domain (Vendée, France)

Romain Augier <sup>\*1</sup>, Flavien Choulet <sup>2</sup>, Alexandre Beaudoin <sup>1</sup>, Thomas Poitrenaud <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO UMR 7327) – Université d'Orléans, CNRS : UMR7327,  
BRGM(BRGM) – France

<sup>2</sup> Laboratoire ChronoEnvironnement UMR 6249 – CNRS : UMR6249, Université de Franche-Comté – France

Rock thermal evolution is a critical parameter that controls rheology and therefore strongly influences orogenic wedge dynamics. Through the combination of geophysical and petrological tools, the geometry and the thermal structure of oceanic subduction zones is now known with details. At the other end, orogens that switched from subduction to warmer collisional belt or even late-orogenic evolution have, at least partly lost these early orogenic features. Conversely, such belts show a polyphased tectonometamorphic evolution recorded in various P/T environments that is not easy to deconvolve. To do so, this contribution puts temperature constraints over an entire orogenic segment.

The coastal South Armoricain Domain that corresponds to a segment of the internal zones of the Variscan belt is exemplary of that discussion. Indeed, one of the most striking features of the area is the coexistence of HP thrusts and well preserved HP/LT units equilibrated in the blueschists facies and abundant mid to lower crustal rocks cropping out as a series of migmatite-cored MCC bounded by extensional shear zones.

More than 100 samples, consisting of CM-bearing metasediments, were collected over the coastal parts of Vendée. Samples were selected along series of almost orthogonal representative cross-sections and as single isolated samples from the 3 main tectonometamorphic units. RSCM results show significant variations in the structural organization of CM. While some samples are characterized by 5 bands spectra with a prominent D3 band, a D4 shoulder and a very large D1 band that corresponds to low temperatures ( $> 330^{\circ}\text{C}$ ), some other yielded perfect graphite structure reflecting high temperatures ( $> 640^{\circ}\text{C}$ ). Spatial distribution of the temperatures allows describing the nature and the importance of the main structures. Ca.  $100^{\circ}\text{C}$  abnormal jumps were recorded across two major thrusts dating back from the orogen building while a ca.  $200^{\circ}\text{C}$  normal-sense gap was recognized all along what may correspond to a detachment zone roofing a large-scale core complex. Besides, internal thermal structure of the different units show important differences. HP units show an amazing consistency of the temperature at ca.  $550^{\circ}\text{C}$ . Conversely, the lower unit show thermal field gradient ranging from more than  $60^{\circ}\text{C}/\text{km}$  at the bottom to ca.  $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$  toward the top. These results, combined with age-constraints are discussed in the frame of the polyphased tectonometamorphic character of the area.

**Mots-Clés:** Mature orogen, RSCM, temperature, South Armoricain Domain

<sup>\*</sup>Intervenant

## La chaîne varisque vue depuis son front nord : dynamique du front de chaîne, sous-charriage crustal de la marge avalonienne et délamination associée de la lithosphère supra-subduction

Olivier Averbuch <sup>\*ψ1</sup>, Frederic Lacquement <sup>2</sup>, Francis Meilliez <sup>1</sup>, Fabien Graveleau <sup>1</sup>, Laurent Beccaletto <sup>2</sup>,  
Bruno Vendeville <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences - Université de Lille - CNRS : UMR8187, ULCO - France

<sup>2</sup> BRGM - Direction des Géoressources - BRGM - France

L'étude du front de déformation varisque septentrional revêt un intérêt particulier puisqu'il permet de contraindre la dynamique tardive de la collision, à la fin du Carbonifère, alors que les domaines internes, préalablement structurés dès le Dévonien supérieur, tendent à s'affaisser au coeur du système orogénique. Au cours des 20 dernières années, l'analyse couplée des données de terrain et de sub-surface (forages, profils sismiques) dans le nord de la France et le sud de la Belgique (depuis le Boulonnais jusqu'au massif des Ardennes) a permis de préciser la géométrie et la cinématique du front chevauchant montrant en particulier : (1) une localisation importante de la déformation sur la zone de chevauchement frontal avec un déplacement cumulé sur les principaux chevauchements imbriqués de plus de 50 km ; ces chevauchements dissèquent tardivement le bord sud du bassin molassique d'avant-chaîne houiller dans une cinématique de type " hors-séquence ". L'analyse des profils sismiques couplée aux expériences de modélisation analogique suggèrent que ce processus soit associé à l'existence de rétro-chevauchements profonds dans l'avant-pays du Brabant formant une zone de butoir frontal (géométrie de type " zone triangulaire frontale profonde "); (2) une forte segmentation du front de chaîne en lien avec la pré-structuration de la marge avalonienne lors de l'épisode de rifting majeur du Dévonien inférieur. Ce dispositif initial de la marge qu'on peut suivre depuis le sud de l'Angleterre jusqu'en Allemagne, montre qu'il ne s'agit pas là de la marge de l'Océan Rhéique, tel que défini classiquement (i.e. ouvert au cours de l'Ordovicien) mais d'un océan Rhéno-hercynien plus tardif, probablement ouvert dans un système d'arrière-arc associé à la subduction de l'Océan Massif central-Sud Armorican au Dévonien. La géométrie de l'ensemble du prisme orogénique nord varisque jusqu'à la zone de suture rhéno-hercynienne (i.e. la zone de faille du Sud Hunsrück) n'est pas accessible sur une transversale passant par le nord de la France car enfouie sous le bassin de Paris. Les coupes établies en Allemagne à l'échelle de ce prisme (Oncken et al, 2000) montrent un raccourcissement d'environ 180 km de la croûte supérieure avalonienne sans aucune implication de la croûte inférieure sous-jacente. Il est proposé ici que cette dernière, découpée de sa partie supérieure, ait été enfouie dans le canal de subduction rhéno-hercynien puis sous-charriée à la base de la croûte armoricosaxothüringienne au cours d'un processus impliquant la délamination progressive de la lithosphère supra-subduction. Sur le modèle himalayen, la propagation sous-crustale d'une lame de croûte inférieure avalonienne très à l'arrière de la zone de suture et le découplage induit entre croûte et manteau lithosphérique au sein de la plaque supérieure (Armorica-Saxothuringia-Gondwana) pourrait rendre compte à la fois du transfert du raccourcissement sur le front sud-varisque et de l'évolution HT de la racine orogénique au cours de la collision.

**Mots-Clés:** Front chevauchant nord varisque, marge rhéno, hercynienne, sous, charriage crustal, délamination lithosphérique

## Géométrie, nature et origine de l'Anomalie Magnétique du Bassin de Paris (AMBP) : apport de nouvelles modélisations 2D

Julien Baptiste <sup>\*ψ</sup><sup>1,2</sup>, Guillaume Martelet <sup>2,1</sup>, Laurent Beccaletto <sup>1</sup>, Michel Faure <sup>2</sup>, Yan Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> BRGM -France

<sup>2</sup> Institut des sciences de la Terre d'Orléans (ISTO), CNRS – Université d'Orléans, CNRS : UMR7327, BRGM – France

L'Anomalie Magnétique du Bassin de Paris (AMBP) est un objet emblématique du Bassin parisien étudié depuis les années 30. Cette anomalie magnétique de forte intensité et d'origine supracrustale est localisée au centre du Bassin parisien, le long d'une étroite bande qui s'étend de manière continue sur environ 600 km depuis le nord du Massif central au sud, jusque dans la Manche au nord. Malgré de nombreuses propositions de modèles géodynamiques et de tentatives de modélisation, sa géométrie, son extension spatiale et son origine restent encore un mystère scientifique.

Disposant d'un cadre géologique mis à jour suite à la récente cartographie structurale et lithologique du substratum du Bassin parisien, et bénéficiant de données pétrophysiques (susceptibilité magnétique et densité) d'un maximum de lithologies présentes à l'affleurement au sein des massifs varisques (Baptiste, 2016), nous proposons de nouvelles modélisations 2D conjointes de l'anomalie magnétique et gravimétrique le long de trois profils. Parmi ces profils, l'un recoupe le forage pro-fond de Couy qui constraint la profondeur et les paramètres pétrophysiques des unités géologiques qui se superposent au corps à l'origine de l'AMBP – ce qui permet d'appréhender plus finement sa géométrie.

La source à l'origine de l'AMBP correspondrait ainsi à un large corps s'étendant sur environ 40km d'est en ouest, s'approfondissant et s'amincissant progressivement vers le nord. La profondeur minimale de ce corps se situerait aux environs de 4000m à proximité du Massif Central au sud, alors qu'elle serait proche de 10000m au nord. Ce corps est bordé à l'est par un accident majeur qui traverse l'ensemble du Bassin parisien selon une direction N-S au sud et qui s'oriente dans une direction N140 E au nord, aux abords de la Manche.

Les paramètres pétrophysiques utilisés pour les modélisations sont ceux de certaines granodiorites et diorites du Massif armoricain et du Massif Central et des granites du Champ du Feu, affleurant dans les Vosges Septentrionales, à la fois fortement magnétiques mais de densité intermédiaire. Ces modélisations suggèrent que le corps à l'origine de l'AMBP correspondrait à un corps magmatique intermédiaire de type granite ou granodiorite qui se serait mis en place dans un couloir de déformation très étroit.

**Mots-Clés:** AMBP, Bassin parisien, Modélisation, Aéromagnétisme, Gravimétrie

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: j.baptiste@brgm.fr

## Premières données géochronologiques sur les granites du substratum pré-mésozoïque du Bassin parisien

Julien Baptiste <sup>\*ψ1,2</sup>, Jérémie Melletton <sup>1</sup>, Laurent Beccaletto <sup>1</sup>, Michel Faure <sup>2</sup>, Marc Poujol <sup>3</sup>,  
Philippe Lach <sup>1</sup>

<sup>1</sup> BRGM – France

<sup>2</sup> Institut des sciences de la Terre d'Orléans (ISTO), CNRS – Université d'Orléans, CNRS : UMR7327, BRGM – France

<sup>3</sup> Université Rennes 1, CNRS, Géosciences Rennes UMR 6118 (GR) – Université de Rennes 1, Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes, INSU, CNRS : UMR6118 – France

A partir du milieu du 20ème siècle, l'interface substratum pré-mésozoïque/remplissage mésocénozoïque du Bassin parisien a fait l'objet de nombreuses investigations, notamment par le biais de forages profonds pour la recherche d'hydrocarbures. Parmi ces forages, certains ont atteints les lithologies du substratum et ont été carottés, donnant accès à une information directe sur sa nature. Ainsi plusieurs plutons de granitoïdes, aussi mis en évidence par l'interprétation des données géophysiques ont été intersectés. Or la nature pétrologique et l'âge de ces granites n'ont jamais été caractérisés jusqu'à présent.

Dans l'objectif de combler cette lacune, certains de ces granitoïdes ont été échantillonnés (prélèvement sur carottes) pour leur analyse pétrographique et leur datation; il s'agit de granites gneissiques issus des forages de Sennely-1 et de Blancafort-1, et d'une granodiorite issue du forage de Moulins-102. Les échantillons ont été datés par LA-ICP-MS sur zircon et monazite. Les analyses isotopiques menées sur les zircons donnent des âges à  $501 \pm 3$  Ma et  $477 \pm 4$  Ma respectivement pour les granites de Sennely et de Blancafort, et des âges à  $344 \pm 2$  Ma pour la granodiorite de Moulins. Les analyses isotopiques effectuées sur monazite donnent des âges à  $334 \pm 4$  Ma pour le granite de Sennely et  $324 \pm 6$  Ma pour le granite de Blancafort, ainsi que des âges à environ 293 Ma pour les deux granites.

Ces roches plutoniques enfouies sous la couverture mésocénozoïque du Bassin parisien sont datées ici pour la première fois. Ces nouvelles données géochronologiques suggèrent des âges cambro-ordoviciens pour la mise en place des granites de Sennely et Blancafort. Le scénario suivant, prenant en compte l'évolution géologique régionale, peut être avancé: les granites de Sennely et de Blancafort se sont mis en place lors des épisodes de rifting continental du Paléozoïque inférieur. Ils ont ensuite été affectés par des événements thermiques et tectoniques importants qui pourraient être rattachés à une phase de déformation d'âge viséen comme cela est établi pour des plutons du Morvan ou de la Montagne Bourbonnaise. La granodiorite de Moulins se serait mise en place au Viséen inférieur. Enfin une probable phase d'hydrothermalisme tardive aurait affecté les granites de Sennely et de Blancafort au cours du Permien.

**Mots-Clés:** Granite, Géochronologie, Zircon, Monazite, Bassin Parisien

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: [j.baptiste@brgm.fr](mailto:j.baptiste@brgm.fr)

## La place du Bassin Sarro-Lorrain dans la chaîne varisque: structure et timing de mise en place

Laurent Beccaletto <sup>\*ψ1</sup>, Olivier Averbuch <sup>2</sup>, Alain Izart

<sup>1</sup> BRGM – DGR/GBS Orléans – France

<sup>2</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – Université de Lille, CNRS : UMR8187, Université du Littoral Côte d'Opale – France

Le Bassin Sarro-Lorrain (BSL) est uniquement connu en subsurface dans l'est du Bassin de Paris sous les séries sédimentaires mésozoïques, en prolongation occidentale du bassin de Sarre-Nahe affleurant en Allemagne. La nature de son remplissage sédimentaire, d'âge Pennsylvanien (Westphalien-Stéphanien) à Permien, est connue par l'intermédiaire de nombreux forages d'exploration houillère et pétrolière, la plupart antérieurs à 1990; les séries sont constituées de sédiments silicoclastiques argileux à conglomératiques riches en charbons (principalement au Westphalien), typiques d'environnements fluvio-lacustres. De grandes incertitudes subsistent quant à la structure du BSL, essentiellement en raison du peu de profils sismiques accessibles à la communauté scientifique. L'hypothèse communément admise (fondée entre autre sur de rares profils sismiques datant des années 1960) est celle d'une subsidence initiée au Namuro-Westphalien et continue au moins jusqu'au début de Permien; la sédimentation serait contrôlée par un réseau de failles normales (e.g. la faille de Metz), potentiellement à composante décrochante, situées au nord du futur bassin.

Dans le but de lever les incertitudes mentionnées ci-dessus, plus de 180 km de lignes sismiques pétrolières acquises dans les années 1980 ont été retraitées ces dernières années par le BRGM et l'Université de Lille, auxquels s'ajoutent 175 km retraités par le BRGM. L'interprétation de ces profils sismiques retraités avec des moyens modernes donne une image inédite de la géométrie et de l'extension cartographique du BSL (e.g. la discordance nette entre les séries westphaliennes et stéphano-permiennes, possible prolongation du BSL vers le nord au-delà de la faille de Metz). Nous interprétons les géométries sédimentaires ou structurales observées en terme d'inversion tectonique négative à la fin du processus orogénique varisque: les failles normales contrôlant la sédimentation stéphano-permienne ("rifting") s'enracinent ainsi sur les chevauchements contemporains de la sédimentation antérieure westphalienne, de type molassique.

Afin de replacer le BSL dans son contexte géodynamique, ces nouvelles observations sont confrontées aux déformations varisques connues plus à l'est en Allemagne, où elles sont décrites en détail; le BSL enregistrerait alors l'évolution syn- puis post-orogénique (selon le processus d'inversion tectonique) d'un segment de la zone saxothuringienne directement au sud de la suture rhénohercynienne.

**Mots-Clés:** Bassin Sarro, Lorrain, profils sismiques, varisque

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: l.beccaletto@brgm.fr

## Comparaison du chemin pression-température des éclogites de l'unité supérieure des gneiss et de l'unité intermédiaire (Limousin, Massif Central français).

Anissa Benmammar <sup>\*1,2</sup>, Julien Berger <sup>\*</sup>  $\psi^1$ , Abderrahmane Bendaoud  $\varphi^3$ , Stéphanie Duchêne  $\S^1$

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – Observatoire Midi-Pyrénées, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UMR239, Université Paul Sabatier [UPS] - Toulouse III, CNRS : UMR5563, Université Paul Sabatier (UPS) - Toulouse III - France

<sup>2</sup> Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene [Alger] (USTHB) - Algérie

<sup>3</sup> Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene [Alger] (USTHB) – BP 32 EL ALIA 16111 BAB EZZOUAR ALGER, Algérie

Le Massif central français occidental est caractérisé par deux unités contenant des évidences de métamorphisme de haute pression. Dans cette étude, nous comparons les chemins Pression-Température (P-T) des éclogites provenant des deux unités à travers deux exemples dans le Limousin : les éclogites rétromorphosées de Puy de Ferrières appartenant à l'unité supérieure des Gneiss (USG) et les éclogites fraîches de Benayes appartenant à l'unité intermédiaire.

Les éclogites de Puy de Ferrières sont toujours largement rétromorphosées : l'omphacite y est rarement préservée et les grenats sont partiellement remplacés par des symplectites à Amph-Pl. Cependant, les zonations chimiques dans les grenats permettent de reconstituer les conditions du pic éclogitique à 700°C - 18 kbar avec une exhumation marquée par un pic de température autour de 800°C à 9 kbar, compatible avec les résultats thermobarométrie Gt-Amph-Pl-Qz donnant 750-800°C pour 7-9 kbar.

Les éclogites de Benayes, sont des éclogites fraîches à disthène et amphibole, elles apparaissent en reliques au sein de l'unité intermédiaire au sein de micaschistes à grenat. Contrairement aux éclogites de l'USG, elles se distinguent par une paragenèse éclogitique bien préservée à Omph-Gt-Ky-Amph-Rt. La modélisation thermodynamique indique des conditions de pression température de 650°C pour un pic en pression à 25-30 kbar. La thermobarométrie Gt-Cpx-Ky donne des conditions autour de 650°C pour un pic en pression de 22-25 kbar. Les premières estimations thermométriques sur les assemblages rétrogrades n'indiquent pas de réchauffement significatif lors de l'exhumation.

Le Massif central se caractérise donc par deux unités de haute pression marquées par des chemins P-T différents. L'unité intermédiaire contient des éclogites fraîches de HP-BT (Benayes) caractérisées par des gradients géothermiques progrades faibles (7°C/Km). L'USG se distingue par des éclogites rétromorphosées de HP-MT avec des gradients plus élevés (13°C/Km) et une exhumation marquée par un réchauffement de plus de 100°C. Cette évolution HT-BP a été datée à  $365 \pm 5$  Ma par U-Pb sur zircons provenant d'un leucosome d'une amphibolite migmatitique. Afin de mieux contraindre le métamorphisme haute pression dans le temps et l'espace, des datations des différentes portions des chemins pression-température seront réalisées pour déterminer l'âge et, potentiellement, la durée des subductions pré-orogéniques dans le Massif central français.

**Mots-Clés:** hercynien Massif central français métamorphisme haute pression éclogites modélisation thermodynamique

\*Intervenant

## Définition et implications d'une unité tectono-métamorphique intermédiaire dans le Massif central occidental (Limousin, Rouergue)

Julien Berger <sup>\*ψ1</sup>, Anissa Benmammar <sup>2</sup>, Abderrahmane Bendaoud <sup>1,3</sup>, Stéphanie Duchêne <sup>1</sup>,  
 Julien Serrano <sup>1</sup>, Jean-Marc Baele <sup>4</sup>, Oliver Bruguier <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) - Institut de Recherche pour le Développement, Université Paul Sabatier - Toulouse 3, Observatoire Midi-Pyrénées, CNRS: UMR5563 – France

<sup>2</sup> Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene [Alger] (USTHB) – Algérie

<sup>3</sup> Université des sciences et de la technologie Houari boumediene (USTHB) – Algérie

<sup>4</sup> Université de Mons – Belgique

<sup>5</sup> Géosciences Montpellier – Institut national des sciences de l'Univers : UMR5243, Université de Montpellier : CNRS France

Le Massif central français occidental est classiquement subdivisé en unités tectono-métamorphiques comprenant (1) le para-autochtone, dominé par des micaschistes du faciès schiste vert, (2) l'unité des gneiss inférieurs (UGI) dominé par des orthogneiss et des paragneiss du faciès amphibolite (localement migmatitiques), (3) une unité des gneiss supérieurs (UGS) dominée par des paragneiss souvent migmatitiques contenant des lentilles d'éclogites rétromorphosées et (4) des unités épizonales peu étudiées. De nouvelles observations réalisées à Najac (Rouergue), au niveau de la klippe de la Bessenoit (Decazeville) et dans le Limousin permettent de définir une unité intermédiaire, localisée entre UIG et USG, et constituée de micaschistes éclogitiques localement associés à des orthogneiss porphyroclastiques et des roches basiques/ultrabasiques montrant un métamorphisme de haute pression-basse température. L'étude métamorphique des micaschistes et éclogites de Najac et du Limousin donne des conditions P-T autour de 600-650°C 22-30 kbar au pic de pression et un chemin rétrograde marqué une décompression quasiment isotherme. Les datations récentes réalisées par Lotout et al (2018) à Najac placent le pic de pression à 385 Ma. Le métamorphisme HP de l'unité supérieure des gneiss n'est pas encore daté mais de nouvelles investigations géochronologiques menées par notre équipe contraintent l'évolution haute température post-éclogitique (~800-850°C à 0.8-1 GPa) à 360-365 Ma (U-Pb zircon) dans l'amphibolite migmatitique de Laguépie et l'unité ophiolitique Limousine (formant la base de l'UGS). Les micaschistes de l'unité intermédiaire à Najac se distinguent par des zircons hérités exclusivement paléozoïques (données préliminaires), en opposition aux métasédiments de l'UIG et USG contenant également des zircons précambriens. Les données géochimiques obtenues sur les complexes basiques-ultrabasiques de l'unité intermédiaire donnent des affinités de type MORBs (complexe stratiforme de Najac) et supra-subduction (éclogites du Limousin) différentes des éclogites et amphibolites de l'UGS. Cette unité intermédiaire indique qu'au moins deux générations de matériaux éclogitiques sont présents dans le Massif central et que l'évolution haute température fini-dévonienne (~360 Ma) enregistrée dans l'UGI et l'UGS mais pas dans l'unité intermédiaire est intervenue avant la superposition finale des unités métamorphiques.

**Mots-Clés:** Eclogite, subduction, varisque, Limousin, Rouergue

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: [Julien.BERGER@Get.omp.eu](mailto:Julien.BERGER@Get.omp.eu)

## Multi-scale strainfield analysis using geostatistics: Investigating the rheological behavior of the hot Variscan crust of the Pyrenees (Axial Zone)

Bryan Cochelin <sup>\*1,2,3</sup>, Charles Gumiaux <sup>3</sup>, Dominique Chardon <sup>2,4</sup>, Yoann Denèle <sup>2</sup>,  
Benjamin Le Bayon <sup>1</sup>

<sup>1</sup> BRGM(BRGM) (BRGM) - Univ. Orléans, CNRS, BRGM, ISTO, UMR 7327, F-45071, Orléans, France - France

<sup>2</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) - Institut de Recherche pour le Développement, Université Paul Sabatier - Toulouse 3, Observatoire Midi-Pyrénées, CNRS: UMR5563 - France

<sup>3</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans - UMR7327 (ISTO) - BRGM : UMR7327, Orléans

<sup>4</sup> Institut de recherche pour le développement (IRD [Burkina Faso]) - Burkina Faso

Determination of principal strain and stress directions in the lithosphere has always been a key task for understanding and constraining plate tectonics. Mapping and analysis of strain/stress field patterns bring constraints on the mechanical behavior of crust/lithosphere. For ductile deformation, foliation and stretching lineations can be considered as good proxies of principal strain axes orientations. Indeed, foliation and lineation trajectories allow investigating how the direction of principal strain axes change through space and deciphering homogeneous from heterogeneous strains by considering gradients and trajectory curvatures. Nevertheless, the trajectory maps produced manually may be intrinsically qualitative. Considering this limitation, geostatistics can be used to quantitatively analyze spatial variations in the orientation of structural measurements and to obtain the best fitted interpolated maps. In the present study, we provide a quantitative way to analyze and interpolate strainfields from ductile fabric field measurements using geostatistics. Based on variogram analysis and kriging interpolations, cleavage and lineation trajectory maps were automatically computed at different scales from a same field structural dataset. For the example provided by the hot Variscan crust of the Pyrenees, the analysis of cleavage/stretching lineations orientation and kinematic data documents pure shear conditions recorded during convergence. Strain was vertically partitioned between an upper crust submitted to homogeneous thickening responding to N-S (orogen-normal) shortening and a hot and partially molten mid-lower crust affected by horizontal longitudinal (orogen-parallel) flow. The emplacement of plutons and gneiss domes generated heterogeneities in the upper crust and induced strain localization into steep anastomosed transpressional shear zones flanking those structures. Our results show that geostatistics applied to structural geology are powerful tools for retrieving tectonic regimes of large orogenic segments by identifying and quantifying perturbations in the strainfields induced by protracted and potentially complex tectonic histories. The variogram analysis also gives first order clues to evaluate whether the considered structural domains underwent single continuous ductile or polyphased brittle-ductile deformation.

**Mots-Clés:** Strain partitioning, variogram analysis, kriging interpolation, transpression, hot orogen

\*Intervenant

## Impact of 100 Ma-long tectonic history on the finite strainfield of the western French Massif Central: implications on Variscan geodynamics and the formation of ore deposits

Bryan Cochelin <sup>\*1</sup>, Charles Gumiaux <sup>1</sup>, Hélène Marasa <sup>1</sup>, Florence Cagnard <sup>2</sup>, Gloaguen Eric <sup>2</sup>, Stanislas Sizaret <sup>1</sup>, Benjamin Le Bayon <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans - UMR7327 (ISTO) - BRGM : – France

<sup>2</sup> BRGM – Univ. Orléans, CNRS, ISTITO, UMR 7327, F-45071, Orléans, France – France

The French Massif Central (FMC) forms the hinterland of the west-European Variscan belt and was subject to numerous tectonic and metamorphic events from Devonian to Permian times. The accreted tectonic units belonging to Gondwana and Laurussia were variably involved in subduction, nappe stacking and syn- to post-orogenic extension. This orogenic evolution implies that early fabrics and metamorphic paragenesis were partially to totally erased by later ones, especially where partial melting was involved. Indeed, plutons showing crustal affinities and migmatites are very common in the Variscan belt. Therefore, the resulting finite strainfield would reflect the interference between fabrics formed at different stages during orogenic cycle. Furthermore, widespread partial melting favored fluid circulations (e.g. within faults or shear zones), which enhanced mobilization of metals through time. We present a model of finite strainfield of the western FMC on the basis of the analysis of ductile and brittle fabrics at regional to local scale using geostatistics. Ductile fabrics within autochthonous units and syn-collisional plutons are poorly disturbed and reflect the transition from syn-thickening to extensional lateral flow of the partially molten middle crust. To the contrary, allochthonous units are affected by numerous perturbations including polyphased ductile shearing, folding and faulting inducing possible bloc tilting and rotations. By deconvoluting the overprint of late tectonic events, we show that early fabrics related to High Pressure metamorphism or nappes' stacking (D1/D2) have suffered intense reorientations. As an example, the finite trend of L1-L2 lineations must be treated with extreme caution and may not reflect the original direction of stretching and shearing that occurred during the building of the mountain belt. Taking into account the location and the amount of perturbations of these early fabrics, the prevailing model of nappes' stacking of allochthonous units by south-vergent thrusting can be re-evaluated. Alternative models are thus discussed in order to explain the tectonic evolution of this segment of the Variscan belt. At least, we present the spatial correlation between the location of mineralized bodies and their relative proximity to i) plutons and ii) the main structures described in the strainfield. This analysis allows us to illustrate how mineralization adds some clues to constrain geodynamic contexts in orogens.

**Mots-Clés:** Variscan belt, mineralization, tectonics, geostatistics

\*Intervenant

## Structure et mode de mise en place des dômes du Chiroulet et du Lesponne (Pyrénées, Zone Axiale), des exemples de partitionnement vertical de la déformation en convergence

Bryan Cochelin <sup>\*1,2,3</sup>, Baptiste Lemirre <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans - UMR7327 (ISTO) – BRGM : Institut national des sciences de l'Univers : UMR7327, Université d'Orléans : UMR7327, CNRS : France

<sup>2</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – Institut de Recherche pour le Développement, Université Paul Sabatier - Toulouse 3, Observatoire Midi-Pyrénées, CNRS: UMR5563 – France

<sup>3</sup> BRGM – Univ. Orléans, CNRS, ISTO, UMR 7327, F-45071, Orléans, France

Suite à une phase de collision continentale, la chaîne varisque ouest-européenne a connu une phase tardi-orogénique caractérisée par un amincissement crustal. Cet évènement se traduit à la fois dans les zones internes et dans les zones externes de la chaîne par i) la formation de dômes gneissiques extensifs symptomatiques d'une anomalie thermique au Moho suivie ii) par la formation d'étroits bassins houillers transtensifs. Dans ce schéma global, le segment pyrénéen, localisé au niveau de l'avant-pays de la chaîne, occupe une place singulière. En effet, bien que caractérisée par la formation de dômes gneissiques, la déformation de la croûte varisque des Pyrénées résulte d'une phase de convergence nord-sud au Permi-Carbonifère. Cette déformation est partitionnée entre i) une croûte moyenne partiellement fondu, observée au cœur des dômes gneissiques, qui tend à fluer latéralement et ii) une croûte supérieure métasédimentaire affectée par un étirement vertical ou des chevauchements à vergence sud. La zone de transition entre ces deux domaines en amincissement et en épaisseissement demeure encore à ce jour mal contrainte dans les Pyrénées. Cette étude porte sur les massifs du Chiroulet et du Lesponne, situés dans la partie nord-occidentale de la Zone Axiale. Ces deux massifs forment deux dômes à cœur migmatitique (Chiroulet) ou paragneissique et magmatique (Lesponne) et furent interprétés comme des diapirs dans les années 80. Cependant, aucune étude structurale de détail n'a été réalisée depuis pour contraindre leur mode de formation. A partir d'une carte géologique mise à jour, d'une nouvelle carte structurale et de coupes séries, nous montrons l'existence de trois domaines : i) un cœur migmatitique, affecté par un étirement ONO-ESE et des cisaillements plats à cinématique "top vers l'ouest à nord-ouest" ; ii) une zone intermédiaire à andalousite et sillimanite où la foliation mylonitique est intensément plissée et affectée par des bandes de cisaillement plurimétriques à cinématique chevauchante "top-nord" et iii) un domaine supérieur à biotite ou chlorite où la stratification est transposée par une schistosité de plan axial redressée à pendage sud portant des linéations à pitch fort. La prédominance des chevauchements à vergence nord, à l'opposé de ceux observés dans la moitié sud de la Zone Axiale permet de porter un regard nouveau sur ce domaine transpressif de la chaîne varisque et de discuter de l'existence et/ou de la signification d'une hypothétique faille nord-pyrénéenne entre la Zone Axiale et les massifs nord-pyrénéens au Carbonifère.

**Mots-Clés:** Chaîne varisque, transpression, Pyrénées

<sup>\*</sup>Intervenant

## Contexte tectonique de la mise en place des granites de la presqu'île de St Tropez (massif des Maures, SE France) : marqueur de l'évolution tardi-orogénique à la transition Carbonifère-Permien

Michel Corsini <sup>\*ψ1</sup>, Olivier Bolle <sup>2</sup>, Hervé Diot <sup>3,4</sup>, Raphael Melis <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Côte d'Azur, Geoazur UMR7329, 250, rue Albert-Einstein, 06560 Sophia Antipolis, France - CNRS : UMR7329 - France

<sup>2</sup> Département de Géologie, Université de Liège, Allée du Six Août 12, 4000 Sart Tilman, - Belgique

<sup>3</sup> UMR-CNRS 6112, Laboratoire de Planétologie et Géodynamique, Université de Nantes, Rue de la Houssinière 2, 44322 Nantes Cedex3, France - CNRS : UMR6112 - France

<sup>4</sup> Faculté de Sciences et Technologie, Université de La Rochelle, Avenue M. Crépeau, 17402 La Rochelle Cedex 1, France - Université de La Rochelle - France

Dans le massif des Maures-Tanneron, les derniers stades d'évolution de la chaîne varisque à la transition Carbonifère-Permien sont marqués par une fusion partielle très importante de la racine orogénique avec la production d'un grand volume de granites. Dans la presqu'île de St Tropez au Sud-Est du massif des Maures, plusieurs corps granitiques sont intrusifs dans les gneiss migmatitiques. Au Sud-Ouest de la presqu'île, la granodiorite de Gigaro présente une forme très allongée avec une orientation Nord-Sud. Au centre et à l'Est, le leucogranite de Camarat est constitué par plusieurs ensembles, qui présentent des facies à grain grossier et à grain fin imbriqués avec une orientation globalement Est-Ouest. La cartographie détaillée des ces différents corps granitiques et de leur encaissant gneissique, complétée par une étude structurale à différentes échelles et par l'étude de la fabrique des granites, permet de préciser le contexte tectonique de cet épisode magmatique daté à environ 300 Ma. L'ensemble des données structurales et les fabriques magmatiques montrent que la mise en place de ces granites est contrôlée par le jeu de grandes zones de cisaillement ductiles décrochantes à jeu senestre d'orientation subméridienne. Nous proposons un modèle selon lequel les magmas se sont injectés le long de ces zones de cisaillement senestres et dans les domaines en ouverture qui se développent en pull-apart entre ces zones de décrochements.

Dans le massif des Maures-Tanneron, ce régime tectonique tardi-orogénique en transpression associe la mise en place des granites et l'ouverture des bassins de la fin du Carbonifère au jeu de zones de décrochement majeures et de plissements subméridiens. Il se poursuit au Permien par l'ouverture de bassins Est-Ouest qui s'accompagne d'un abondant volcanisme.

Un modèle d'évolution est proposé à l'échelle de l'ensemble de la chaîne varisque européenne du Sud-Est à la transition Carbonifère-Permien.

**Mots-Clés:** chaîne varisque, Carbonifère, Permien, magmatisme, massif des Maures

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: corsini@unice.fr

## Apport de matériel felsique en base d'arc par sous-placage : un exemple de relamination tectonique (Mirbat, Oman)

Yoann Denèle <sup>\*1</sup>, Jérôme Ganne <sup>1</sup>, Jean-Louis Paquette <sup>2</sup>, Julien Berger <sup>1</sup>, Marion Marchelli <sup>1</sup>,  
Pierre Barbey <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – Observatoire Midi-Pyrénées, Université Paul Sabatier [UPS] - Toulouse III, CNRS: UMR5563 – France

<sup>2</sup> Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) – CNRS: UMR6524 – France

<sup>3</sup> Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG) – Université de Lorraine, CNRS: UMR7358 – France

L'étude des bilans géochimiques dans les zones de subduction a été à l'origine de la définition du processus de relamination, qui consiste à incorporer en base d'arc du matériel felsique issu de la plaque inférieure. L'ambition de notre étude est de confronter le modèle de relamination à un cas de terrain, à travers l'étude de l'arc de Mirbat. Cet arc néoprotérozoïque est en effet constitué à sa base par une croûte felsique, sous la forme d'une puissante série paradéritivée associée à des lentilles ou boudins d'amphibolites et de harzburgites. La croûte supérieure de l'arc est formée par des gabbros, des diorites et divers types de granitoïdes qui se sont mis en place entre 815 et 790 Ma. Les données géochimiques montrent que les paragneiss sont issus d'un protolith volcanosédimentaire et que les roches basiques associées correspondent à des gabbros de type avant-arc. Les granitoïdes de la croûte supérieure présentent une affinité calco- alcaline et montrent des spectres appauvris en HREE ce qui suggère une mise en place sur un arc océanique relativement épais (~ 30 km). Notre étude structurale souligne que la base de l'arc a été exhumée dans un relais extensif en mode metamorphic core complex. La formation du relais extensif a bloqué localement la remontée des magmas et a préservé la base felsique d'une transformation liée aux transferts magmatiques. Les estimations thermobarométriques indiquent que les roches felsiques ont subi un métamorphisme dans le faciès amphibolite autour de 815 Ma, avec un gradient métamorphique moyen de l'ordre de 20°/km, avant d'être exhumées dans le relais extensif de 30 à 10 km de profondeur. Deux nouvelles datations U-Pb sur zircon montrent que les protolithes des amphibolites et des paragneiss se sont, respectivement mis en place à 843 Ma et déposés autour de 830 Ma. Toutes ces données permettent de proposer un scénario clair pour la formation de l'arc océanique de Mirbat avec successivement : initiation de la subduction à 840 Ma, puis sous-placage de roches volcanosédimentaires à 815 Ma entraînant la formation des paragneiss sous un gradient de l'ordre de 20°/km, et finalement exhumation des paragneiss. À travers cet exemple de terrain, nous proposons que la relamination par sous-placage crustal qui consiste à transférer tectoniquement du matériel de la plaque inférieure vers la plaque supérieure dans les zones de subduction, pourrait être considérée comme une alternative au modèle classique de relamination par diapirisme.

**Mots-Clés:** Subduction, Arc océanique, Relamination, Sous placage

<sup>\*</sup>Intervenant

## Structure du front varisque dans le Hainaut, apport des données minières dans la compréhension des déformations du socle paléozoïque et de sa couverture

Nicolas Dupont <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Olivier Kaufmann <sup>1</sup>, Jean-Marc Baele <sup>1</sup>

1 Université de Mons - Faculté Polytechnique - Service de Géologie Fondamentale et Appliquée (UMONS - FPMs - GFA) - Belgique

Dans le Hainaut, le front varisque se caractérise par la présence d'écailles tectoniques - Ecailles Haine-Sambre-Meuse (HSM) - pincées entre une unité autochtone relativement peu déformée (Parautochtone brabançon) et une unité allochtone fortement plissée (Allochtone ardennais). Le front varisque est recouvert en discordance par une couverture méso-cénozoïque d'épaisseur variable. Dans la partie centrale, cette couverture correspond au " Bassin de Mons " dont l'ampleur des enregistrements sédimentaires est le signe d'une subsidence plus importante. La morphologie du Bassin de Mons est celle d'un synforme complexe dont l'origine a été longtemps discutée. La découverte dans le sondage de Saint-Ghislain de niveaux d'évaporites et de brèches au sein des calcaires mississipiens du Parautochtone a conforté l'hypothèse de l'existence d'une karstification profonde. Cette hypothèse permettrait d'expliquer la subsidence et la morphologie complexe du Bassin de Mons mais aussi la présence de nombreux puits d'effondrement dans la région. Au niveau des Ecailles HSM, les fortes épaisseurs rencontrées localement seraient également liée à cette karstification. Cependant, l'étude des failles syn-sédimentaires présentes dans le Bassin de Mons montrerait l'existence d'un régime transtensif dextre durant Crétacé supérieur, qui expliquerait l'essentiel de sa subsidence.

L'examen des données minières permet de poser un autre regard sur les déformations du socle paléozoïque dans le Hainaut, à la fois dans le Parautochtone et les Ecailles HSM. En particulier, les nombreux plans d'exploitation des veines de charbon permettent d'analyser la structure du socle paléozoïque avec une grande continuité et sur de vastes zones.

Les premiers résultats de ces analyses montrent à quel point les déformations du socle et de la couverture peuvent s'imbriquer, notamment au sein d'une structure transtensive dextre rejouant à plusieurs reprises. La karstification profonde seule ne semble donc pas pouvoir expliquer l'ensemble de ces déformations. Néanmoins, la localisation des puits d'effondrement, principalement situés le long de failles ou de synformes, indiquerait qu'une karstification préférentielle aurait eu lieu suivant des axes privilégiés. Ce contrôle tectonique ainsi que les déformations constatées autour de certains effondrements pourraient être indicateurs du diapirisme local des évaporites mississippiennes dans la région.

**Mots-Clés:** front varisque, socle paléozoïque, bassin de Mons, données minières, Hainaut

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>1</sup>Auteur correspondant: Nicolas.DUPONT@umons.ac.be

## Late-Carboniferous infiltration of meteoric water in Variscan shear zones

Camille Dusséaux <sup>\*ψ1</sup>, Aude Gébelin <sup>1</sup>, Philippe Boulvais <sup>2</sup>, Michel Dubois <sup>3</sup>, Gilles Ruffet <sup>2</sup>,  
Marc Poujol <sup>2</sup>, Yannick Branquet <sup>4,2</sup>, Fabrice Barou <sup>6</sup>, Andreas Mulch <sup>7</sup>

<sup>1</sup> School of Geography, Earth and Environmental Sciences (SoGEES) Plymouth – Royaume-Uni

<sup>2</sup> Géosciences Rennes (GR) – CNRS: UMR6118 – France

<sup>3</sup> LGCgE – Université Lille I - Sciences et technologies – France

<sup>4</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO) – Université d'Orléans, CNRS : UMR7327, INSU, BRGM – France

<sup>6</sup> Geoscience Montpellier – Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc – France

<sup>7</sup> Senckenberg Biodiversity and Climate Research Centre (BiK-F) – Allemagne

Crustal-scale shear zones represent sites of significant fluid circulation and are critical interfaces where metamorphic, magmatic and surface-derived fluids can mix. The Armorican Massif (AM) and the French Massif Central (FMC) are part of the Variscan Belt of Western Europe and are both characterized by ductile shear zones that present spatial and temporal relationships with peraluminous granites emplaced during the late Carboniferous. Combining microstructural, hydrogen isotope ( $\delta D$ ), geochronology (U/Pb and Ar/Ar) and fluid inclusion analysis of granitic mylonite samples, we aim at understanding the mechanisms of fluid flow and fluid-rock interaction that occurred during high-temperature deformation in these fossil hydrothermal systems. Based on the hydrogen isotope ratios of synkinematic muscovite ( $\delta D_{\text{muscovite}}$ ) from mylonitic leucogranite, we determine the source of fluids that infiltrated different types of shear zones in the southern part of the AM. Combined with temperatures of hydrogen isotope exchange deduced from quartz microstructures, EBSD and Ti-in-Ms thermometry, we calculate the hydrogen isotope ratios of water ( $\delta D_{\text{water}}$ ) present in these shear zones during high-temperature deformation. Results indicate a variation of the  $\delta D_{\text{water}}$  values from -33‰ in the lower part of the Sarzeau detachment footwall to -74‰ in the upper part of the Quiberon and Piriac detachments footwall that we interpret to reflect a progressive interaction with meteoric fluids. Infiltration of surface-derived fluids is also supported by fluid inclusions in quartz grains from the same samples that are composed of low to very low salinity water (0.5 to 4.2 wt% eq. NaCl).

In agreement with hydrogen isotope results obtained in the southern part of the AM, syntectonic leucogranites from the Millevaches massif (western part of the FMC) yield  $\delta D_{\text{muscovite}}$  values as low as -116‰ that indicate an incontestable signature of meteoric fluids. Based on  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and U/Pb dating, we propose that penetration of such D-depleted fluids occurred between ~320 and 300 Ma through brittle normal faults developed during upper-crustal extension while the emplacement of high-grade metamorphic rocks in the middle-lower crust sustained fluid convection at depth. Calculated  $\delta D_{\text{water}}$  values provide paleoaltimetry estimates suggesting that this part of the Variscan orogen reached a moderately-high elevation during the late Carboniferous.

**Mots-Clés:** Variscan, shear zones, Armorican Massif, Massif Central, hydrogen isotope, fluid, rock interaction, meteoric fluids, paleoaltitude

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: camille.dusseaux@plymouth.ac.uk

## Arguments en faveur d'un événement orogénique d'âge Permien dans la chaîne du Rif (Nord du Maroc)

Asmae El Bakili <sup>\*ψ1,2</sup>, Michel Corsini <sup>2</sup>, Valérie Bosse <sup>3</sup>, Jean Marc Lardeaux <sup>2,4</sup>, Christian Nicollet <sup>3</sup>, Ahmed Chalouan <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculté des sciences Rabat - Université Mohammed V - 4 avenue Ibn Batouta, B.P. 1014 Rabat. - Maroc

<sup>2</sup> Geoazur - Université Côte d'Azur(UCA), UMR7329 - 250 rue Albert-Einstein, 06560 Sophia Antipolis - France

<sup>3</sup> Laboratoire Magmas et Volcans - Université Clermont Auvergne, Campus universitaire des Cezeaux - 6 avenue Blaise Pascal, 63170 Aubière - France

<sup>4</sup> Centre for Lithospheric Research - Czech Geological Survey- Klárov 3, 118 21 Prague 1 – République tchèque

L'existence d'un événement varisque est proposée depuis longtemps dans les unités internes de la chaîne du Rif. Cet événement a notamment été identifié dans les unités métamorphiques du massif de Beni Bousera, situées à la base des Sebtides inférieures. Cependant dans le Rif, la signification géodynamique de cet événement varisque reste largement discutée à l'heure actuelle. En particulier l'existence d'une chaîne de collision varisque dans le Rif est toujours débatue. Pour préciser le contexte géodynamique de cet événement varisque, une étude géochronologique, couplée à une étude pétrologique détaillée, a été réalisée dans l'unité des métapélites granulitiques du massif de Beni Bousera. Cette unité contient un assemblage granulitique de haute pression à grenat, feldspath potassique, plagioclase, rutile, disthène et quartz. Les datations U-Th-Ph par LA-ICP-MS effectuées sur des monazites incluses dans des grenats qui contiennent cette paragenèse ont fourni des âges permiens compris entre  $278 \pm 5$  Ma et  $285 \pm 3$  Ma. Ainsi, dans le Rif, les conditions métamorphiques, qui caractérisent la base des unités métamorphiques des Sebtides inférieures, permettent d'écartier l'idée d'un environnement géodynamique lié à une croûte continentale stable en cours d'amincissement au Permien. Elles témoignent au contraire d'un épaissement crustal important, caractéristique de l'évolution d'une chaîne de collision continentale. Ces nouvelles données permettent de discuter l'intégration du Nord du Maroc dans le système orogénique varisque.

**Mots-Clés:** U/Th/Pb sur Monazite, métamorphisme granulitique, Beni Bousera, Rif interne, chaîne varisque.

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: [asmae.elbakili@geoazur.unice.fr](mailto:asmae.elbakili@geoazur.unice.fr)

## The late- to post-Variscan dioritic dykeswarm of the Argentera-Mercantour massif and its tectono-metamorphic record.

Marco Filippi <sup>\*1</sup>, Guido Gosso <sup>1</sup>, Jean-Marc Lardeaux <sup>2</sup>, Maria Iole Spalla <sup>1</sup>, Chrystele Verati <sup>2</sup>,  
Davide Zanoni <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze della Terra "A. Desio", Università di Milano – Italie

<sup>2</sup> Géoazur (GEOAZUR) – Université Nice Sophia Antipolis (UNS), INSU, Observatoire de la Côte d'Azur IRD, CNRS: UMR7329 – Bâtiment 1, 250 rue Albert Einstein Les Lucioles 1, Sophia Antipolis 06560 VALBONNE, France

The progressive emplacement of igneous bodies of various sizes was a major process that ruled the renewal of the continental crust after the apex of the Variscan collision. Although late- to post-Variscan magmatic intrusions have been locally reported as intermittent events, if considered at the scale of the whole European Variscan belt, their age range of tens of millions years reflects the long lasting perturbed thermo-mechanical state that has been affecting the lithosphere since the end of the Variscan cycle. In the southern Variscan belt, two main magmatic sequences are described, the first of which, markedly calc-alkaline, records Lower Permian ages and has been accommodated by transpressive to transtensive structures, while the second, which comprises alkaline granitoids and lesser tholeites, has emplaced since the Middle Permian under a pure extensional tectonic regime. Conversely, in most of the External Crystalline massifs (ECMs), which are segments of the southern Variscan belt reworked by the Alpine collision, late- to post-collisional magmatism have ended at the down of Permian time. But there are notable exceptions: in particular, a dioritic dyke swarm crosscuts both migmatitic basement and late- to post-collisional granitoids in the Argentera-Mercantour ECM. These NE-SW trending and steeply dipping dykes display well-developed chilled margins and vesicular texture; within them, soft contacts and magmatic breccias involving different igneous lithotypes are the final outcome of complex intrusive processes. WR analyses show that these dykes are magnesian, calc-alkalic to alkali-calcic and peraluminous, while intrusive relationships and igneous textures indicate a shallow emplacement level. The occurrence of these dioritic dykes implies an extension of the magmatic activity in the Argentera-Mercantour ECM beyond the Permo-Carboniferous boundary, in line with what is reported in the southern Variscan belt. Moreover, thermobarometric constrains on their superposed metamorphic assemblages have allowed to define a complete P-T-t path from the magmatic emplacement to the Alpine exhumation.

**Mots-Clés:** External Crystalline Massifs, lateVariscan magmatism

<sup>\*</sup>Intervenant

## Modélisation 3-D de la structure du bassin minier du Nord-Pas-de-Calais : analyse critique des anciennes interprétations de 1905 et 1963

Fabien Graveleau <sup>\*ψ1</sup>, Olivier Averbuch <sup>1</sup>, Benoît Crépin <sup>2</sup>, Thierry Oudoire <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – Université de Lille, CNRS : UMR8187, Université du Littoral Côte d'Opale – France

<sup>2</sup> Société Géologique du Nord (SGN) – Université de Lille - Sciences et Technologies – France

<sup>3</sup> Musée d'Histoire Naturelle de Lille – Ville de Lille – France

La dynamique d'un front de chaîne de montagnes résulte d'interactions entre les processus de déformation (la tectonique) qui initient les reliefs et les processus de surface (l'érosion, la sédimentation, le climat) qui les détruisent. Souvent étudiée à partir d'exemples naturels récents, cette thématique est peu abordée sur des chaînes de montagnes anciennes. Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons au Bassin Houiller du Nord-Pas-de-Calais, bassin d'avant-chaîne localisé au front Nord de la grande chaîne varisque, développée il y a environ 300 Ma. L'exploitation de ce bassin pour son charbon a fait de lui un objet industriel et sociétal singulier qui a façonné l'histoire régionale. Aujourd'hui, il s'agit d'un territoire en reconversion dont le développement s'inscrit dans la durabilité tant industrielle, économique, qu'écologique. Pour soutenir cette dé- marche, il est nécessaire d'améliorer les connaissances scientifiques et notre compréhension du sous-sol, notamment la géométrie des différents ensembles sédimentaires et des discontinuités qui les affectent. Dans ce travail, nous exposons les premières étapes d'un vaste projet visant à reprendre les nombreuses données géologiques disponibles sur le bassin (forages, levés de galerie, imagerie géophysique) et d'en proposer une interprétation géologique intégrée dans un environnement en trois dimensions. Pour cela, nous menons une analyse critique de la géométrie du bassin lors de sa première représentation 3-D en 1905 et dans sa version actuellement considérée, datant de 1963. Dans un avenir proche, nous proposerons une interprétation actualisée du bassin intégrant les concepts scientifiques modernes de la dynamique des fronts de chaîne. Nous en détaillerons ici la méthodologie et les premiers résultats. L'enjeu est important car ce nouveau modèle du sous-sol pourra servir de support scientifique de base aux problématiques environnementales et énergétiques discutées en région - notamment le potentiel géothermique.

**Mots-Clés:** Chaine varisque, bassin flexural, charbon, bassin minier, modélisation structurale

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: fabien.Graveleau@univ-lille.fr

## Vaughnérites des Vosges : datations U-Pb sur zircon par LA-ICP-MS et hypothèses génétiques

François Guillot <sup>\*ψ1</sup>, Olivier Averbuch <sup>1</sup>, Michel Dubois <sup>2</sup>, Cyril Durand <sup>2</sup>, Pierre Lanari <sup>3</sup>,  
Cyrille Delangle <sup>4</sup>, Arnaud Gauthier <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - CNRS : UMR8187, Université Littoral Côte d'Opale, Univ. Lille – France

<sup>2</sup> Laboratoire de Génie-Civil et géo-Environnement (LGCgE) – Univ. Lille – France

<sup>3</sup> Institute of Earth Sciences, Uni. Bern – Suisse

<sup>4</sup> Terrae Genesis – Académie Nancy-Metz – France

Les vaughnérites des Vosges affleurent (**1**) dans les Vosges méridionales, en masses plutoniques marginales du Granite des Ballons, formant au contact de ce dernier une brèche magmatique et (**2**) dans les Vosges centrales (région de Plainfaing), en dykes composites, intrusifs dans un complexe de migmatites et de roches métamorphiques appelé granito-gneiss. Il s'agit dans les deux cas de roches mélanocrates riches en Bt magnésienne et Hnb (20 à 40% vol.) [1]. Les minéraux clairs ont cristallisé en dernier : Pl et Kfs en phénocristaux renferment des inclusions de Bt et Hnb, Kfs et Qz se retrouvant pour leur part en position interstitielle. L'âge U-Pb obtenu par LA-ICP-MS pour les zircons d'un gneiss à sillimanite du granito-gneiss encaissant des vaughnérites de Plainfaing est de 455 ± 12 Ma, révélant un bâti pré-varisque à protolith ordovicien. Les zircons de quatre vaughnérites donnent des âges de 340 ± 6 Ma pour les Ballons, et de 340 ± 25 Ma, 340 7 Ma et 335 ± 10 Ma à Plainfaing. Les vaughnérites sont donc synchrones, au Viséen, de l'événement magmatique majeur, exprimé tant dans les séries volcano-sédimentaires (p. ex. Série du Markstein) que dans les granites magnésio-potassiques des Vosges centrales et méridionales (Ballons, Crêtes) [2].

Il est maintenant admis que les "magmas vaughnériques" (s.l.) dérivent directement de la fusion partielle d'un manteau enrichi [3], ici par les subductions éo-varisques. Une nuance à cette hypothèse serait d'y voir un produit dérivé du magmatisme magnésio-potassique. Dans les plutons magnésio-potassiques viséens des ségrégations gravitaires de ferro-magnésiens auraient engendré des formations semi-cumulatives sous forme de (**1**) brèche magmatique marginale au Granite des Ballons ou (**2**) dykes associés au Granite des Crêtes et intrusifs dans le granito-gneiss voisin de Plainfaing. Cette idée a été défendue notamment pour la genèse des durbachites du versant alsacien des Vosges [4]. Afin de tester l'hypothèse d'une formation de vaughnérites à partir de la lignée magnésio-potassique, avec déjà la proximité des âges, des études géochimiques sur minéraux (Bt, Hnb, Pl, zircon...) permettront de mieux apprécier ces éventuels liens de parenté entre les différentes formations plutoniques viséennes.

REFERENCES ET NOTES - [1] Bt=biotite ; Hnb=hornblende ; Pl=plagioclase ; Kfs=feldspath alcalin ; Qz= quartz - [2] Schaltegger et al., EPSL, 1996 ; Tabaud et al., JGSL, 2015 - [3] Couzinié et al., EPSL, 2016 - [4] Gagny, CRAcSc, 1978; Fluck, Sci. Géol. Bull. Mém. Strasbourg, 1980; Cashman et al., Science, 2017.

**Mots-Clés:** lamprophyre, Varisque, Vosges, lignée magnésio-potassique

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: Francois.Guillot@univ-lille.fr

## Métasyénites à néphéline et jadéite associées aux Micaschistes Argentés du Grand Paradis

François Guillot <sup>1</sup>, Cyril Durand<sup>2</sup>, Philippe Recourt<sup>3</sup>, Christian Chopin<sup>4</sup>, Pierre Lanari<sup>5</sup>, Xian-Hua Li <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - CNRS : UMR8187, Université Littoral Côte d'Opale, Univ. Lille - France

<sup>2</sup> Laboratoire de Génie-Civil et géo-Environnement (LGCgE) - Univ. Lille - France

<sup>3</sup> Laboratoire d'Océanologie et Géosciences (LOG) - CNRS : UMR8187, Université Littoral Côte d'Opale, Univ. Lille

<sup>4</sup> Laboratoire de Géologie (UMR8538) - CNRS- CNRS (France), Ecole Normale Supérieure de Paris - ENS Paris

<sup>5</sup> Inst. Earth Sciences, Uni. Bern - Suisse

<sup>6</sup> State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China - Chine

Le Massif Cristallin Interne du Grand Paradis (GP), structuralement au plus profond des Alpes Occidentales, est pour l'essentiel un pluton permien de granite porphyrique, qui a été soumis au métamorphisme éclogitique et aux déformations alpines tertiaires. Dans cet orthogneiss sont intercalés des gisements circonscrits de "whiteschists", appelés ici Micaschistes Argentés (MA). Il s'agit de clinochlorite à chloritoïde magnésien ± phengite ± phlogopite ± margarite ± talc. Les MA ont été à maintes reprises utilisés (depuis Chopin, thèse Paris-6, 1979) pour évaluer les conditions de pression et température du métamorphisme alpin grâce à leur minéralogie particulière. Leur chimie (p. ex. SiO<sub>2</sub> < 40%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 25%, richesse en terres rares) évoque des lamprophyres. Une réinvestigation cartographique détaillée, assortie d'examens systématiques en microscopie électronique, a permis la découverte de faciès à néphéline ± jadéite dans les métasyénites associées comme "banc par banc" aux MA du Plan des Évettes (E7,1119° - N45,3614°, commune de Bonneval-sur-Arc, Savoie). Le zircon magmatique qui abonde dans toutes ces roches a fourni des âges U-Pb identiques, aux incertitudes de mesure près, à celui des orthogneiss du GP, soit vers 270 Ma. La néphéline, trouvée d'abord dans des métasyénites mésocrates, semble y remplacer tardivement de la paragonite, de petites plages amiboïdes de quartz étant par ailleurs comme isolées de l'albite dominante par un liseré d'aegyrite et d'amphibole bleue. Ce faciès mésocrate, avec une texture grenue équante originelle encore perceptible, est légèrement sursaturé (quartz normatif vers 3%). Plus rares, des syénites albítiques sous-saturées (Ne normative vers 10%), mélanocrates à cause d'un pigment hématitique diffus, ne contiennent plus de quartz mais montrent l'association albite + jadéite + néphéline. Par leurs textures, leur minéralogie et leur géochimie, ces faciès évoquent certaines fénites sodiques (Vartiainen & Woolley, Geol. Surv. Finland Bull., 1976). Même si pour ce gisement les carbonates sont quasi absents, ce type de syénite est classiquement associé à des carbonatites. Or le Grand Paradis contient plusieurs gisements de sidéritite autrefois exploités pour leur fer (Cevales, Rendic. Soc. Min. It, 1961). Réanalysée, la sidéritite affleurant près du refuge du Carro s'est révélée exempte de Ca mais riche en Sr et Ba. Il faudra peut-être considérer le GP comme une réserve économique de terres rares, on l'espère sans porter préjudice à son statut de réserve naturelle.

Concernant l'histoire alpine, cette nouvelle occurrence de jadéite a une signification particulière. La réaction réversible jd + ab = ne (sans quartz) ayant lieu vers 0,5 GPa, cela remet en question l'association automatique de la jadéite aux hautes pressions de 2 à 2,5 GPa.

**Mots-Clés:** Gran Paradiso, REE, nepheline, jadeite, albítite, syenite, UHP, economic geology, whiteschists, micaschisti argentei, Silvery Micaschists

## Variscan metamorphic relics in the Alps: differences and similarities from the Helvetic to the Southalpine domains.

Maria Iole Spalla <sup>\*ψ1</sup>, Gisella Rebay <sup>2</sup>, Manuel Roda <sup>1</sup>, Davide Zanoni <sup>1</sup>, Michele Zucali <sup>1</sup>,  
Jean-Marc Lardeaux <sup>3</sup>, Guido Gosso <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze della Terra "A. Desio", Università di Milano - Italie

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente, Università di Pavia - Italie

<sup>3</sup> UMR 7329, Géoazur, Université Nice Sophia-Antipolis – Université de Nice Sophia-Antipolis – France

Continental crustal slices preserving pre-Alpine metamorphic imprints are widely described in the Alps, where Variscan-age eclogites (430-326 Ma), generated from continental, oceanic and mantle rocks suggest a pre-Alpine burial of continental crust at convergent plate margins, in a context of oceanic lithosphere subduction underneath a continental upper plate, followed by continental collision (e.g. Marotta and Spalla, 2007; von Raumer et al., 2013; Spalla et al., 2014). Successive pre-Alpine metamorphic records characterized by dominant high-temperature imprints have Permian-Triassic ages (300-220 Ma) and mainly occur within Austroalpine and Southalpine domains of the Alps and are associated with widespread emplacement of large gabbro bodies, acidic intrusives, and spinel-plagioclase bearing peridotites. The Variscan metamorphic evolutions are heterogeneous across the Helvetic, Penninic, Austroalpine and Southalpine domains. A review of these tectono-metamorphic histories in all domains, with relative age ranges, is discussed to infer tectonic trajectories within the subduction-collision systems characterising the Variscan geodynamics of the Alpine continental crust.

Marotta A.M. & Spalla M.I. 2007. Permian-Triassic high thermal regime in the Alps: Result of late Variscan collapse or continental rifting? Validation by numerical modeling. *Tectonics* 26, 1-30. doi:10.1029/2006TC002047

Von Raumer J.F., Bussy F., Schaltegger U., Schulz B. & Stampfli G.M. 2013. Pre-Mesozoic Alpine basements-Their place in the European Paleozoic framework. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 125, 89-108. doi:10.1130/B30654.1.

Spalla M.I., Zanoni D., Marotta A.M., Rebay G., Roda M., Zucali M. & Gosso G. 2014. The transition from Variscan collision to continental break-up in the Alps: insights from the comparison between natural data and numerical model predictions. *Geol. Soc. London Spec. Pub.*, 405, 363-400. doi:10.1144/SP405.11.

**Mots-Clés:** Variscan Metamorphism, subduction, collision, Alps

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: iole.spalla@unimi.it

## Eclogites varisques et roches associées du Massif de l'Argentera-Mercantour (Alpes sud-occidentales) : Marqueurs d'une paléo-suture varisque démembrée

Fabrice Jouffray <sup>\*1</sup>, Maria Iole Spalla<sup>2</sup>, Jean-Marc Lardeaux<sup>1</sup>, Davide Zanoni<sup>2</sup>, Michel Corsini<sup>1</sup>, Gisella Rebay<sup>3</sup>, Michele Zucali<sup>2</sup>, Luca Corti<sup>2</sup>, Marco Filippi<sup>2</sup>, Silvia Volante<sup>2</sup>, Luca Spaggiari<sup>2</sup>, Guido Gosso<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Géoazur (GEOAZUR) - Université Nice Sophia Antipolis - France / <sup>2</sup> Dipartimento di Scienze della Terra - Italie /

<sup>3</sup> Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente [Pavia] - Italie

Si la limite Nord de la chaîne varisque européenne est bien identifiée et son évolution tectonique bien caractérisée, sa limite Sud-Est reste très mal connue du fait de sa restructuration par l'orogenèse alpine. Les témoins de la chaîne varisque sont abondants dans l'ensemble du domaine externe des Alpes, mais la signification et la place des Massifs Cristallins Externes (MCE) dans la chaîne varisque d'Europe restent à ce jour mal définies. Afin de répondre à ces questions nous présentons les premiers résultats d'un programme de recherche commun aux universités de Milano et de Nice-Sophia-Antipolis focalisé sur le Massif de l'Argentera-Mercantour. Nous présentons et discutons :

- Une cartographie géologique rénovée du Massif de l'Argentera-Mercantour,
- Une analyse structurale des principaux sites où affleurent les éclogites varisques et les roches qui leur sont associées,
- Des analyses géochimiques (majeurs, traces, terres rares), minéralogiques et pétrologiques (analyses des phases, thermobarométrie, pseudosections) de ces roches.

Dans le Massif de l'Argentera-Mercantour de nombreux affleurements d'éclogites plus ou moins rétromorphosées ont été identifiés. Les éclogites y sont associées à des granulites basiques de haute-pression (pyrigarnites), des périclases à spinelle, des serpentinites et des marbres à silicates et quartz. Eclogites et roches associées affleurent sous forme de boudins au sein de différents types de migmatites (paragneiss migmatitiques à grenat-biotite-sillimanite; paragneiss migmatitiques à cordiérite; orthogneiss migmatitiques) identifiés, mais aussi au sein des granites de ce massif, montrant ainsi qu'il n'existe pas d'unité tectono-métamorphique spécifique à métamorphisme de Haute-Pression comme c'est le cas dans le Massif Central Français par exemple. Les roches basiques dérivent de basaltes et gabbros tholéïtiques avec des signatures de N-MORB dérivant de la fusion partielle d'un manteau appauvri en LREE's (manteau supérieur). Les roches ultramafiques sont des lherzolites à spinelle souvent serpentinisées et les roches calc-silicatées, à teneur variable en grenat, pyroxène, epidote et plagioclase, représentent le produit de la rééquilibration à haute température de rodingites. Eclogites et roches associées sont donc les témoins d'une ancienne lithosphère océanique impliquée dans l'orogenèse varisque. Les conditions P-T du métamorphisme de haute-pression ont été quantifiées entre 1,5 et 2 GPa pour des températures comprises entre 660 et 750 °C, typiques du faciès des Eclogites à Amphibole. Ces conditions témoignent de paléo-gradients varisques < à 15 °C/km, caractéristiques de processus de subduction océanique. Eclogites et roches associées sont donc les témoins d'une paléo-suture varisque cryptique et totalement démembrée lors de la mise en place des migmatites et des granites en collision continentale.

**Mots-Clés:** Subduction, paléo, suture, éclogites, pyrigarnites, amphibolite, métamorphisme, N, MORB, thermobarométrier

## The Variscan evolution of NW Africa : a re-evaluation

Rémi Leprêtre <sup>\*ψ1</sup>, Francis Chopin<sup>φ2,3</sup>, Karel Schulmann<sup>3,2</sup>, Jean-François Ghienne<sup>3</sup>,  
Mohammed El Houicha<sup>4</sup>, Dominique Frizon De Lamotte<sup>§ 1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géosciences et Environnement Cergy (GEC) – Université de Cergy Pontoise : EA4506 – France

<sup>2</sup> Centre for lithospheric research, Geological Survey – République tchèque

<sup>3</sup> Ecole et Observatoire des sciences de la terre de Strasbourg (EOSTS) – CNRS: UMS830 – France

<sup>4</sup> Faculté des Sciences (LGG), Université Chouaib Doukkali – Maroc

NW Africa shows preserved remnants of the Variscan belt in Morocco and Algeria. They are part of the Late Paleozoic collisional system that is well-known on the North American counterpart and widely considered as the southwestern continuation of the European Variscan belt. Nonetheless, this portion of the belt displays puzzling features. The Variscan belt in Morocco is in distal position with respect to the main belt that has been dissected by the Atlantic opening, e.g. no oceanic suture is found and it is hardly possible to localize the front of a major collisional belt there. The structural framework is well described but the Meseta in the north with S- and W-verging structures and displaying strong deformation evidences (Barrovian metamorphism) contrasts with the quite simple fold-and-thrust belt of the Anti-Atlas in the south with mainly SE vergent structures and no evidences of strong crustal deformations. The differences of orientation, intensity of deformations and magmatic activity imply strong strike-slip displacements along the South Meseta Fault Zone that may have juxtaposed two different domains during the Variscan orogeny. Anyway, the pre-Variscan paleogeography of the area is still poorly constrained. In this contribution, we reconsidered the structural, metamorphic and magmatic features in order to propose a new interpretation of the Variscan belt in NW Africa. We emphasize the fact that Morocco and Algeria were deeply affected by Late Devonian- Early Carboniferous very hot rifting events. This pre-Variscan inherited structural and thermal framework had a crucial impact on the subsequent evolution of the Variscan domain in NW Africa. In the light of new observations, new metamorphic, dating and seismic data and the critical evaluation of the available literature about NW African Variscan and other modern and ancient belts, we propose a new model to explain the peculiar features of the Variscan belt in NW Africa. The setting of these hot Devonian-Early Carboniferous hot rifts shortly before the Late Carboniferous inversion allowed the development of Barrovian metamorphism within the former rifts under changing compressional stress directions during the Late Carboniferous up to the Early Permian. We then discuss the integration of NW Africa in the Variscan world.

**Mots-Clés:** NW Africa, Variscan, hot rift inversion

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: remi.lep@gmail.com

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: f.chopin@unistra.fr

<sup>§</sup>Auteur correspondant: dominique.frizon-de-lamotte@u-cergy.fr

## Timing and duration of Variscan high-pressure metamorphism in the French Massif Central: petrochronological insights from the Najac Massif

Caroline Lotout <sup>\*†1</sup>, Pavel Pitra <sup>1,2</sup>, Marc Poujol <sup>1</sup>, Robert Anczkiewicz <sup>3</sup>, Jean Van Den Driessche <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Rennes UMR 6118, Université Rennes 1 (GR) – Université de Rennes 1, Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes, CNRS : UMR6118 – France

<sup>2</sup> Česká geologická služba – République tchèque

<sup>3</sup> Institute of Geological Sciences, Polish Academy of Sciences, Research Centre in Cracow – Pologne

Precise and accurate investigation of geochronometers in the light of a detailed petrological context is the best way to fully understand the evolution of metamorphic rocks. Eclogite-facies rocks highlight the early stages of orogenesis; constraining their P-T-t evolution is then of paramount importance to any geodynamic interpretation. An eclogite sample from the Najac Massif (south French Massif Central) displays a zircon-bearing garnet-omphacite-amphibole-rutile-quartz peak assemblage. Pseudosection modelling suggests peak pressure conditions of 15–20 kbar, 560–630°C. Eclogite-facies garnet displays Lu-rich cores and Sm-enriched rims and yields a Lu-Hf age of  $382.8 \pm 1.0$  Ma and a Sm-Nd age of  $376.7 \pm 3.3$  Ma. These ages are interpreted as marking the beginning of the prograde garnet growth during the initial stages of the eclogite-facies metamorphism, and the high-pressure (and temperature) peak reached by the rock, respectively. Zircon grains display chondrite-normalized REE spectra with variably negative, positive or no Eu anomalies and are characterized by either enriched or flat HREE patterns. However, they yield a well constrained in situ LA-ICP-MS U-Pb age of  $385.5 \pm 2.3$  Ma, despite this REE pattern variability. Zr zonation in garnet, Y content in zircon and the diversity of zircon HREE spectra may suggest (i) that zircon crystallized prior to and during incipient garnet growth on the prograde P-T path, in numerous pulses, or (ii) that local REE equilibria were recorded and preserved in zircon. The zircon age of  $385.5 \pm 2.3$  Ma, comparable within error with the Lu-Hf age obtained on garnet, is interpreted as dating the beginning of the eclogite-facies metamorphism. Accordingly, the duration of the prograde part of the eclogite-facies event is estimated at  $6.1 \pm 4.3$  Myr. Coarse crystals of apatite, that formed late in the metamorphic history at significantly lower pressure, yield a U-Pb age of  $369 \pm 13$  Ma interpreted as the timing of the subsequent exhumation. Combined with the HP dating results obtained, via a similar petrochronological approach, in the adjacent Lévézou Massif (Lotout et al., same volume), constrained at ca. 358 Ma, these results allow to discuss not only the age of the HP metamorphism but also the geodynamics of the French Massif Central.

**Mots-Clés:** petrochronology, HP metamorphism dating, French Massif Central

Intervenant

<sup>#</sup>Auteur correspondant: caroline.lotout@gmail.com

## Paleotemperature investigation of the Variscan southern external domain: a Raman Spectroscopy of Carbonaceous Material study in the Paleozoic series of Montagne Noire (France)

Clément Montmartin <sup>\*1</sup>, Michel Faure <sup>1</sup>, Hugues Raimbourg <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans - UMR7327 (ISTO) – BRGM, Université d'Orléans– France

The Montagne Noire, located in the southern part of the French Massif Central represents the meridional part of the Variscan belt external area. It is subdivided in three parts. The Axial Zone, made of a granite-migmatite dome, is surrounded by non- or weakly metamorphosed Paleozoic sedimentary series. Both northern and southern flank of the Montagne Noire are deformed by km-scale, south-verging, recumbent folds, and thrusts. A foreland turbiditic basin develops in the southern part of the Montagne Noire. The Raman Spectroscopy of Carbonaceous Material (RSCM) method has been carried out in the sedimentary or low-grade metamorphic rocks of the South side of the Montagne Noire. The measured temperatures, comprised between 400°C near the dome, and 230°C in the southern domain, constrain isotherms to cut across the different nappe contacts and to lie parallel to the Axial dome limit. This temperature distribution supports the idea that the thermal structure was acquired as a result of the emplacement of the Axial Zone dome. Our precise measurements comply with previous studies on illite crystallinity, conodont colour alteration, and fluid inclusions carried out in the Montagne Noire south flank that documented a low grade-metamorphism increasing towards the dome. The thermal structure acquired during nappe emplacement and burial seems totally overprinted and really hard to decipher in this complex zone. However, several areas present high temperatures that contrasts with the bulk N-S gradient. This may suggest the presence of hidden intrusive bodies beneath the sedimentary rocks of the foreland basin. The discrepancy in temperatures between RSCM on the one hand and illite crystallinity and conodont colour alteration on the other hand, in a domain relatively remote from the dome, point to a contrasting record of short-lived thermal pulses by the different methods. RSCM recorded the effect of the Axial Dome heat pulse over a much broader area than the other methods, probably as a result of more efficient kinetics of reaction. For thermal events with a short lifetime, in the low temperature range, the different geothermometers available provide therefore variable results.

**Mots-Clés:** Raman Spectroscopy of Carbonaceous Material (RSCM), Granite migmatite dome, Montagne Noire South side, Variscan orogen, French Massif Central

<sup>\*</sup>Intervenant

## Structural configuration of Tadla basin and Phosphate plateau basement inferred from processing and interpretation of Gravity and aeromagnetic data

Abdellah Nait Bba <sup>\*1</sup>, Mustapha Boujamaoui <sup>2</sup>, Adnen Amiri <sup>3</sup>, Younes Hejja <sup>1</sup>, Ibtissam Rezouki <sup>4</sup>, Lahssen Baïdder <sup>1</sup>, Mohamed Hedi Inoubli <sup>3</sup>, Ahmed Manar <sup>5</sup>, Haddou Jabbour <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Hassan II University, Faculty of Sciences Aïn Chock, Geosciences Laboratory, BP 5366 Maarif, Casablanca, Maroc

<sup>2</sup> Moulay Ismail University, Faculty of Sciences and techniques Errachidia, – Maroc

<sup>3</sup> Tunis El-Manar University, Faculty of Sciences Tunis, Department of Geology, Tunisie

<sup>4</sup> Moulay Ismail University, Faculty of Sciences of Meknes, Meknes, Maroc

<sup>5</sup> Ministry of the Energy, Mines and Sustainable Development, BP Rabat Instituts, Maroc

<sup>6</sup> National Office of Hydrocarbons and Mining, Rabat 10050, Morocco – Maroc

The study area is located in the Variscan Western Meseta (Morocco); It consists of two main zones; the Tadla Basin in the south and the Phosphates Plateau in the north, set up on the Meseta Proterozoic and Paleozoic basement exposed in the uplifted area of the Central Morocco, Rehamna and the Jebilet massifs to the north and north-east of the study area, to the West and southwest respectively. All these Paleozoic massifs are massively studied, and are subdivided into major tectonic units bounded by major regional faults. The extension of these faults and the liaison between the Rehamna, Jebilet and the Central Morocco Massifs has been poorly studied yet, as it disconnected structurally by low areas covered by sediments of Mesozoic and Cenozoic age (Tadla Basin and Phosphates Plateau sedimentary cover). The aim of this study is to investigate the subsurface configuration of this region in order to infer more accurate structural information. To overcome these issues, we use the analysis and interpretation of gravity and aeromagnetic data. The data filtering and processing involved various recently edge techniques such as horizontal gradient, theta map, Euler deconvolution, and tilt angle. These were accomplished by an extensive geological interpretation. The results of this study are as follow: 1) the study area are controlled predominantly by significant tectonic faults having NE-SW and NW-SE major trends, with E-W and N-S minor trends 2) Confirmation of many faults already recognized by previous study, and reveal some new crustal-scale structures, 4) The extension in the subsurface of the majors basement crustal-scale faults of the Western Meseta such as; the West Meseta Shear Zone, Smaala-Oulmes Fault Zone, Fkih Ben Salah Fault.

**Mots-Clés:** Tadla Basin, Phosphates Plateau, Gravity, Aeromagnetic, Transformed maps, Basement configuration

Intervenant

## Post-Hercynian tectono-sedimentary evolution of an extensive intra-continental rift basin controlled by the upwelling of a metamorphic core complex (Bidarray Basin, Western Pyrenees)

Nicolas Saspiturry <sup>\*1</sup>, Bryan Cochelin <sup>2,3</sup>, Philippe Razin <sup>1</sup>, Sophie Leleu <sup>1</sup>, Baptiste Lemirre <sup>3</sup>,  
Benoît Issautier <sup>2</sup>, Olivier Serrano <sup>2</sup>, Eric Lasseur <sup>2</sup>, Thierry Baudin <sup>2</sup>

<sup>1</sup> ENSEGID - Institut polytechnique de Bordeaux - France

<sup>2</sup> BRGM/ISTO/Université d'Orléans - BRGM- 3, avenue Claude Guilemin 45060, Orléans, France

<sup>3</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) - Observatoire Midi-Pyrénées, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UMR239, Université Paul Sabatier [UPS] - Toulouse III, CNRS : UMR5563, France

The collision between the Gondwana plate and the Laurussia continent leads to the European Hercynian mountain building. This belt defines the pre-Permian basement of Europe, whose southwestern part materializes the current basement of the Pyrenees. The Permian is known to be an extensive phase, affecting a thick continental crust, inherited from the Hercynian orogenic phase. The Bidarray Basin is a privileged place to understand the evolution of an extensive post-Hercynian basin in terms of sedimentary, structural and crustal thinning mechanisms. This work is part of the OROGEN project co-funded by TOTAL-BRGM-INSU. This integrated study combines: sedimentary facies analysis, detailed geological mapping, structural cross-sections and correlation transects. The Bidarray Basin appears as a N-S trending narrow graben which is part of a post-hercynian intracontinental rift. The western margin is composed of hyper-concentrated alluvial fans interdigitating eastward with a longitudinal N-S fluvial system. This basin is interpreted to develop as an extensional basin on the hanging wall of a southward detachment system forming as a consequence of the formation of an immature metamorphic core complex. The present-day Ursuya granulitic unit is believed to be a remnant body of Carboniferous to Permian metamorphic core dome that has been finally denuded later at Cenomanian times. Tectono-sedimentary analysis and deformation patterns of the extensional Ursuya granulitic dome allow the reconstruction of paleogeographical and crustal thinning models explaining the development of the post-orogenic Bidarray Permian basin. The Ursuya gneiss dome is interpreted as an "a-type" metamorphic core complex due to the EW elongation of the gneiss dome (i.e. parallel to regional extension) and the progressive divergence of stretching lineations within the Louhossoa E-W trending southward detachment. This Permian graben is located in an atypical structural zone, respectively on the western and eastern margins of the Mauléon and Basco-Cantabrian Cretaceous rift basins. This almost undeformed N20° Permian basin seems to be responsible of the shift towards the south-west of the Early Cretaceous Pyrenean rift axe. The perfect continuity of the Permian-Triassic paleogeographical and structural trends highlights the homogeneity of the Basque Massifs, showing the absence of major alpine discontinuity between the Cinco-Villas Unit of European paleo-magnetic affinity and the Aldudes Unit, part of the northern-Iberian Cretaceous paleo-margin.

**Mots-Clés:** MCC, Rift, Inheritance, Pyrenees

\*Intervenant

## Late Palaeozoic Palaeomagnetic and Tectonic Constraints for amalgamation of Pangea supercontinent in European Variscan Belt

Karel Schulmann <sup>\*1,2</sup>, Jean Bernard Edel <sup>2</sup>, Jean-Marc Lardeaux <sup>2</sup>, Ondrej Lexa <sup>4,3</sup>

<sup>1</sup> Centre for Lithospheric Research (Czech Geological Survey) - Klárov 3 118 21 Prague 1, République tchèque

<sup>2</sup> Institut de physique du globe de Strasbourg (IPGS) - université de Strasbourg, INSU, CNRS : UMR7516 France

<sup>3</sup> Institute of Petrology and Structural Geology, Charles University, Prague – République tchèque

We review of the evolution of palaeomagnetic directions and sequence of tectonic events in the European Variscan belt during late Palaeozoic times. The early Carboniferous palaeomagnetic records reported mainly from the Rhenohercynian and Saxothuringian magmatic arcs indicate a 70° anticlockwise rotation, while late Carboniferous to Permian magnetic directions are consistent with 120° clockwise rotation of the eastern and central parts of the Variscan belt. Our review of the chronology of tectonic events allows discretizing the 80 Ma long orogenic evolution into five principal events. In our model, the Variscan belt can be regarded as a linear sub-plate, isolated from Gondwana and Laurussia by the Rhenohercynian and Palaeotethysian oceans during Devonian times. This linear composite belt was segmented by transform faults and boundaries in the late Devonian to early Carboniferous times (360 – 335 Ma) during progressive E-W closure of Rhenohercynian ocean synchronously with collision between Saxothuringian and Moldanubian blocks. Subsequent relocation of subduction to the northern boundary Palaeotethysian ocean was responsible for N-S shortening almost orthogonal to the ancient sub-plate N-S elongation at around 335 – 325 Ma. This deformation resulted in dextral reactivation of transform boundaries associated with anticlockwise rotation of intermittent blocks. At the end, the faults were parallelized to the Teyssire-Tornquist zone, while the lozenge-shaped blocks of the former Variscan sub-plate were further shortened during continuous contraction. Subsequently, the Variscan belt suffered a giant transtensional event from 325 to 310 Ma that was related to the development of extensional syn-magmatic core complexes over the whole belt and significant dextral reactivation of earlier NW-SE trending transform faults. During this event new sets of sinistral transfer NNE-SSW trending faults originated, that partly reactivated boundaries of the principal tectonic zones. The whole system subsequently suffered a period of NNE-SSW shortening that affected the Variscan belt namely along the former Laurussian and former Variscan sub-plate contact in the north and in the south, where the giant Cantabrian orocline developed at around 310 – 300 Ma due to hard collision with Gondwana. This deformation is associated with the clockwise rotation of Laurussia together with the accreted northern sector of the Variscan belt, and simultaneous anticlockwise rotation of Gondwana.

**Mots-Clés:** Paleomagnetism, Variscan belt, Geodynamics

<sup>\*</sup>Intervenant

## HP melting of metagranite triggered by hydrous melt infiltration, implications for the exhumation of deeply subducted continental crust in the Variscan Bohemian Massif

Pavla Stipska <sup>\*1</sup>, Pavlína Hasalová <sup>2</sup>, Roger Powell <sup>3</sup>, Prokop Závada <sup>4</sup>, Karel Schulmann <sup>1</sup>, Martin Racek <sup>5</sup>, Carmen Aguilar <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute de Physique de Globe, UMR 7516, Université de Strasbourg, / <sup>2</sup> CLR, Czech Geological Survey, Klárov 3, 118 21, Prague 1, République tchèque / <sup>3</sup> School of Earth Sciences, University of Melbourne, ustralie / <sup>4</sup> Institute of Geophysics, Czech Academy of Sciences, Boční II 1a/1401, 141 31, Prague, République tchèque / <sup>5</sup> Institute of Petrology and Structural Geology, Charles University, Praha - République tchèque

Highly-deformed phengite-biotite metagranites from the Snieznik dome in the Bohemian Massif have been locally converted to stromatic, schlieren and nebulitic textures typical of migmatites. This occurred mostly along subvertical deformation zones and under eclogite-facies conditions. The transition from the banded to migmatite types of orthogneiss is marked by increasing amount of phases interstitial along grain boundaries in monomineral feldspar and quartz aggregates, and by increasing consumption of original but recrystallized K-feldspar grains by embayments of fine-grained plagioclase, quartz and myrmekite (intergrowth of Pl-Qz). The new minerals are in textural equilibrium with phengite. The myrmekite, quartz and feldspars are coarsened up to 0.5 cm size in some migmatite types, and contain phengite inclusions. The features are considered to be the result of grain-scale melt infiltration causing dissolution and crystallization along grain boundaries in the presence of phengite. All the rock types have the same mineral assemblage of Grt-Ph-Bt-Ttn-Kfs-Pl-Qz±Rt±Ilm with similar garnet chemistry in cores: grs0.40–0.45, alm0.48–0.55, prp0.01–0.02, sps0.01–0.02, XFe 0.96–0.98; and at rims: grs0.25–0.35, alm0.60–0.65, prp0.03–0.08, sps0.01–0.04, XFe 0.90–0.92. Phengite has high Si in core (Si=3.30–3.43 p.f.u.) decreasing to rim (Si=3.15–3.10 p.f.u.). Via mineral equilibria modelling, the main mineral assemblage is inferred to have equilibrated at high pressure of the order of 15–17 kbar and 690–740°C, from garnet and phengite compositions in the Grt-Ph-Bt-Ttn-Kfs-Pl-Qz mineral assemblage. The rocks, being H<sub>2</sub>O-undersaturated and being above the temperature conditions of the wet solidus, this will have involved hydrous melt, not H<sub>2</sub>O fluid. Stability of melt-bearing mineral assemblages and mineral chemistry are almost independent of the melt proportion in the system, thus explaining the identical assemblage and mineral chemistry observed in all the migmatite types, but thus also precluding estimation of the amount of melt percolated based on mineral equilibria. Migmatite textures however testify that variable degrees of melt-rock interaction occurred, being low in the banded migmatite types and higher in the nebulitic and schlieren types. Retrograde equilibration was largely restricted to retrograde zoning in phengite, garnet and plagioclase, including crystallization of biotite around phengite and garnet, presumably in a continuous reaction consuming melt down to ~7–10 kbar. The infiltrating melt is likely derived from identical rocks structurally-beneath the observed rocks when they reached muscovite dehydration melting. Melt infiltration along steep deformation zones already at eclogite-facies conditions was pervasive at grain-scale, but localized at several centimetres- to several metres scale. It may have facilitated exhumation along these zones from ~17 to ~7 kbar.

**Mots-Clés:** orthogneiss migmatite, fluid assisted melting, eclogite facies, melt percolation, mineral equilibria modelling, exhumation, relamination, Variscan belt

## Structural analysis and U-Th-Pb geochronology in the Agly Massif (Pyrenees): deciphering between late-variscan and alpine tectonics.

Jonas Vanardois <sup>\*1</sup>, Trap Pierre <sup>†1</sup>, Philippe Goncalves <sup>1</sup>, Didier Marquer <sup>1</sup>, Françoise Roger ,  
Jean-Louis Paquette <sup>2</sup>, Benjamin Le Bayon <sup>3</sup>, Florence Cagnard <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Chrono-environnement (LCE) – Université de Franche-Comté : UMR6249 / <sup>2</sup> Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) – Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, INSU, [IRD], CNRS : UMR6524, Université Jean Monnet - Saint-Etienne, / <sup>3</sup> Bureau de Recherche Géologique et Minière – BRGM – 3 avenue Claude Guillemin, Orléans cedex 2, / <sup>4</sup> BRGM(BRGM) (BRGM) – Univ. Orléans, CNRS, BRGM, ISTO, UMR 7327, F-45071, Orléans

The Agly Massif (AM) of the Variscan Pyrenees consists in a Proterozoic to Devonian metamorphic metasedimentary serie forming (1) a dome-shaped core with migmatites and gneisses mantled by (2) an upper crustal sequence made of schists and micaschists. The metamorphic gradient is very high in the micaschists sequence (60-70°C/km) and becomes very low in the migmatitic gneisses. The tectonic setting responsible for the anomalous thermal regime of the AM is still disputed, and numerous models have been proposed to account for the structuration of this massif: (1) a late-Variscan extensional setting (Bouhallier et al., 1991), (2) a late-Variscan transpressional setting (Olivier et al., 2004, 2008) or (3) a Cretaceous hyper-extended margin setting (Vauchez et al., 2013). In order to bring new insights about the controversial AM gneissic dome, we present a field work analysis and a georeferenced structural dataset obtained on the whole massif. The structure of the AM appears more complex than previously described with at least three superimposed deformation events namely D1, D2 and D3: An early N-S trending S1 foliation developed in the whole metasedimentary sequence. In response to a D2 vertical shortening, S1 is folded by open to tight F2 folds and subsequently transposed into a flat lying S2 foliation, which is the predominant planar fabric of the massif. The S2 bears a mineral and stretching lineation L2, which is gently plunging toward N20. S2 can be very pervasive forming meters-thick mylonitic and ultramylonitic zones that show a pronounced N20 trending stretching lineation along which a top-to-the-north shearing is mostly observed. The D3 deformation is defined by a vertical and E-W trending high-strain corridor that cut across the massif. F3 folds with vertical fold plane and moderately plunging fold axis developed together with a S3 foliation. The observed few L3 stretching lineation and shear criteria may argue for a D3 horizontal shortening with a dextral kinematic component. In order to bring chronological constraints, we performed U-Th-Pb LA-ICP-MS dating on magmatic rocks (i.e. orthogneiss, granite, pegmatite) that were emplaced during or cross-cut one of the above-mentioned D2 and D3 events. All the magmatic rocks gave ages that range between 305 and 290 m.y. with no reset or imprint of cretaceous deformation event. In addition, ages obtained on some pegmatites and leucogranites may indicate that D2 and D3 have overlapped in time. A preliminary tectonic model might be considered with the following evolution: A D1 crustal thickening is responsible for S1 development recorded in the entire metasedimentary sequence. A D2 event is responsible for crustal thinning during late-variscan gravitational collapse or transtension. The late-D2 evolution may have occurred in a regional dextral strike-slip regime that might be responsible for the development of S3 corridor and ascent of deep-seated magmas.

**Mots-Clés:** ductile deformation, Structural analysis, Variscan Pyrenees, Geochronology

\*Intervenant †Auteur correspondant: pierre.trap@univ-fcomte.fr

## Flow of partially molten crust controlling construction, growth and collapse of the Variscan orogenic belt

Olivier Vanderhaeghe <sup>\*1</sup>, Oscar Laurent <sup>ψ2</sup>, Jean-François Moyen <sup>φ3</sup>, Véronique Gardien <sup>§4</sup>,  
 Aude Gébelin <sup>¶5</sup>, Cyril Chelle-Michou <sup>¶6</sup>, Simon Couzinie <sup>\*\*3</sup>, Mathieu Bellanger <sup>ψ7</sup>,  
 Arnaud Villaros <sup>φφ8</sup>, Julien Berger <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – IRD, Université Paul Sabatier - Toulouse 3, Observatoire Midi-Pyrénées, CNRS, UMR5563 – France / <sup>2</sup> ETHZ – Suisse / <sup>3</sup> Laboratoire Magma et Volcans St Etienne – CNRS : UMR6524, Université Jean Monnet - Saint-Etienne, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand 2 – France

<sup>4</sup> Laboratoire de Géologie de Lyon - Terre, Planètes, Environnement (LGL-TPE) – ENS - Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS: UMR5276 – France / <sup>5</sup> University of Plymouth – Royaume-Uni / <sup>6</sup> School of Earth Sciences [Bristol] – Royaume-Uni / <sup>7</sup> TLS Geothermics – Entreprise privée – France / <sup>8</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans - UMR7327 (ISTO) – BRGM : UMR7327

Geological data from the French Massif Central, provide a basis to elaborate a tectonic-geodynamic model for the generation and flow of partially molten rocks and magmatism during orogenic evolution. HT eclogite facies metamorphism of mafic and ultramafic rocks present in the Upper Gneiss Unit (UGU), dated at ca. 430-400 Ma, records subduction of the Gondwana hyperextended margin during the Silurian. The migmatitic UGU characterized by HP granulite facies partly retrogressed into amphibolite facies attests for continental subduction followed by thermal relaxation and decompression. HP partial melting is proposed to have triggered mechanical decoupling of the partially molten continental rocks of the UGU from the subducting slab allowing for buoyancy-driven exhumation and entrainment of subducted oceanic lithosphere and subcontinental mantle. Geochronological data constraining the metamorphic evolution of the UGU points to emplacement of at least two distinct nappes from the middle to the late Devonian. The Lower Gneiss Unit, overthrust by the UGU, is characterized by greenschist to amphibolite facies metamorphism reaching partial melting attributed to thickening of the crust from the late Devonian to the early Carboniferous. Emplacement of laccoliths rooted into strike-slip transcurrent shear zones and capped by low-angle detachments from ca. 345 to ca. 310 Ma is concomitant with propagation of the Variscan deformation front marked by foreland basins. These features reflect horizontal growth of the Variscan belt by lateral flow of the partially molten orogenic root. The diversity of the magmatic rocks attests for mixing of mantle and crustal sources. Younging of the mantle- and crustal-derived plutonic rocks from ca. 345 Ma in the north to ca. 310 Ma in the south suggests southward retreat of a northward subducting slab. Late Carboniferous destruction of the Variscan belt is dominantly achieved by gravitational collapse characterized by the activation of low-angle detachments and the exhumation-crystallization of the partially molten orogenic root forming crustal-scale migmatite domes from ca. 305 Ma to ca. 295 Ma in the French Massif Central coeval with lateral spreading of the external zones. Laccoliths emplaced along low-angle detachments and intrusive dykes with sharp contacts correspond to the segregation of the last melt fraction leaving behind a thick accumulation of refractory LP felsic and mafic granulites in the lower crust.



## 2.2. Dynamique des chaînes de montagnes

## Etude gravimétrique du Hoggar (Algérie): Implications géodynamiques

Abdeslam Abtout <sup>\*1</sup>, Boualem Bouyahiaoui <sup>ψ1</sup>, Mohamed Bendali <sup>φ1</sup>, Hassina Boukerbout <sup>§1</sup>

<sup>1</sup> Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique (CRAAG) - Algérie

Le Hoggar, au sud de l'Algérie, est une chaîne de montagne affleurant au niveau de la plate-forme saharienne. Deux aspects géodynamiques fondamentaux le caractérisent: sa dernière structuration qui s'est faite au Panafricain par la juxtaposition d'unités d'origines et d'âges différents, le long de zones de cisaillement d'échelle continentale; il est aussi le siège d'un bombement topographique actuel, d'échelle lithosphérique, accompagné d'un volcanisme abondant.

Ces observations géodynamiques sont attribuées à plusieurs origines ; point chaud ; poinçonnement de la lithosphère continentale par un panache mantellique intraplaque, ou encore remobilisation par la collision alpine. Ces hypothèses sont basées essentiellement sur des observations de terrain et très peu de données géophysiques. Malgré, les travaux d'acquisition de données gravimétriques réalisés, mais le plus souvent exécutés dans un but de prospection minière, aucune carte de synthèse précise n'a été tracée. Car les différentes campagnes de mesures sont calées sur des réseaux, dont la référence est choisie de façon arbitraire et de plus, la couverture en mesures gravimétriques reste incomplète et hétérogène.

Dans cette étude, un travail important de compilation de données a été entrepris, pour retrouver les paramètres de correction utilisés et appliquer les mêmes normes de corrections (densité, ellipsoïde de référence, altitude, relief etc.). Afin d'homogénéiser et de rattacher les différentes campagnes à un même réseau, nous les avons calés sur une centaine de nouvelles mesures acquises sur le Hoggar et rattachés au Réseau Gravimétrique Absolu Algérien.

La carte des anomalies gravimétriques ainsi obtenues montre une bonne corrélation avec les structures géologiques connues. Les anomalies de courtes longueurs d'onde correspondent au volcanisme situé dans la partie centrale du Hoggar. Les anomalies de grandes longueurs d'onde sont associées aux structures profondes. On remarque essentiellement deux anomalies, l'une négative s'étalant sur tout le Hoggar central et oriental, avec un pic de -105 mGals au-dessus de l'Atakor et une anomalie positive centrée sur le Tanezrouft et le Hoggar occidental. Les bassins bordant le Nord du Hoggar présentent une succession de faibles anomalies positives et négatives. Le traitement et le filtrage de ces cartes (prolongement, gradient etc....), a permis d'élaborer une carte structurale de la région. La comparaison avec la carte géologique montre, dans certain cas une bonne corrélation avec la délimitation des terranes. Dans d'autre cas, nous avons mis en évidence une autre distribution de ces ensembles géologiques. La carte gravimétrique prolongée à différentes altitudes suggère une décomposition du Hoggar en deux blocs au lieu de celle en trois blocs; Hoggar oriental, central et occidental.

Le calcul de la profondeur de ces structures, par application de la méthode d'Euler montre que les accidents sont profonds et atteignent les 50 km.

**Mots-Clés:** hoggar, anomalie gravimétrique, homogénéisation, modélisation

## Lateral Variations in Foreland Flexure of a Rifted Continental Margin: The Aquitaine Basin (SW France)

Paul Angrand <sup>\*ψ1</sup>, Mary Ford <sup>2</sup>, Anthony Watts <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – CNRS : UMR5563 – France

<sup>2</sup> Université de Lorraine, ENSG – Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, UMR 7358 CNRS-UL – France

<sup>3</sup> Department of Earth Sciences, University of Oxford – South Parks Road Oxford OX1 3AN, Royaume-Uni

Rift inheritance can play a key role in foreland basin geometry and behavior. If the foreland basin initiates soon after rifting, thermal cooling can also contribute significantly to subsidence. We investigate the effects of crustal inheritance (Aptian-Cenomanian rifting) on the evolution of the Campanian to middle Miocene flexural Aquitaine foreland basin, northern Pyrenees, France. Surface and subsurface data define rifted crustal geometry and postrift thermal subsidence. Analysis of Bouguer gravity anomalies coupled with flexural modeling constrains the lateral variations of elastic thickness, plate flexure, and controlling loads. The Aquitaine foreland is divided along-strike into three sectors. The relative role of surface and subsurface (i.e., buried) loading varies along-strike, and the elastic thickness values decrease from the northeast (25 km) to the southwest (7 km) where the plate is the most stretched. The eastern foreland crust was not rifted and underwent a simple flexural subsidence in response to orogenesis. The central sector was affected by crustal stretching. Here the basin is modeled by combining topographic and buried loads, with postrift thermal subsidence. In the western sector, the foreland basin was created mainly by postrift thermal subsidence. The eastern and central sectors are separated by the Eastern Crustal Lineament, which is one of a series of inherited transverse faults that segment the orogen.

**Mots-Clés:** Pyrenees, Aquitaine Basin, Foreland basin, Flexure, Thermal subsidence

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: paul.angrand@get.omp.eu

## Analogue modelling of structural and kinematic couplings in fold-and-thrust belts controlled by lateral changes in interbedded décollement rheology

Sandra Borderie <sup>\*1</sup>, Fabien Graveleau <sup>2</sup>, Bruno. C. Vendeville <sup>2</sup>, César Witt <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Département de Géosciences - Sciences de la Terre - Université de Fribourg - Suisse

<sup>2</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - Université de Lille, CNRS : UMR8187, Université du Littoral Côte d'Opale - France

Fold-and-thrust belts (FTBs) can be segmented both across and along strike because of various factors including tectonic and stratigraphic inheritance. We investigated along/across-strike structural interactions in a FTB propagating towards a foreland that displays contrasted lithological sequences.

We ran a set of analogue experiments in a compressional box, in which a thin, single viscous layer having varying width was interbedded within a frictional series. Two models made with and without the interbedded viscous level provided end-member tests. By changing the relative width of the frictional (F) and viscous (V) provinces, we characterized geometrically and kinematically the dynamic and mechanical interaction between both provinces.

Results indicate that there are mutual influences between V and F provinces. First, a F province influences the along-strike tectonic evolution of an adjacent V province. This influence decreases when the width of the V province increases. The frictional provinces control the taper, structural style, obliquity of the structures' trend and the kinematics of the shallow deformation front in the viscous province. Our results evidence how far a frictional province can affect the deformation of an adjacent viscous province. For frictional-viscous wedges, it appears that the critical taper theory, which is generally applied in 2-D, ought to be likely considered in terms of 3-D.

Second, along-strike segmentation in the foreland stratigraphy affects the deformation kinematics of thrusts rooting at depth in the basal frictional *décollement*. In one-province, end-member models, the deep deformation front is located very much backward in the V model, but is located much more forward in the F model. In the two-province models (adjacent F and V provinces), the position of the deformation front at depth in the F province is much more backward than in the end-member model. Similarly, the position of the deep deformation front in the V province is convex towards the hinterland compared with the end-member model, in which it is linear. Therefore, two adjacent F and V provinces influence each other the dynamics of propagation of the deep deformation front by restraining it backward in the F province and pushing it forward in the V province.

We compare our experimental results with natural examples in the Kuqa Basin (Southern Tian Shan, China) and the Salt Range (Pakistan), and gain a new and better understanding of the dynamics of fold-and-thrust belts bearing a viscous *décollement*, such as salt.

**Mots-Clés:** Analogue modelling, fold and thrust belt, viscous décollement, kinematics, structural couplings

\*Intervenant

## Analogue modelling of the mechanical and kinematic coupling in fold-and-thrust belts controlled by lateral changes in the basal décollement strength

Sandra Borderie <sup>\*1</sup>, Fabien Graveleau <sup>2</sup>, Bruno. C. Vendeville <sup>2</sup>, César Witt <sup>2</sup>, Alexandra Skrubelj <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Département de Géosciences - Sciences de la Terre - Université de Fribourg - Suisse

<sup>2</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - Université de Lille, CNRS : UMR8187, Université du Littoral Côte d'Opale - France

<sup>3</sup> Géosciences Montpellier - CNRS : UMR5243, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, Université des Antilles-Guyane - France

Fold-and-thrust belts can be segmented along-strike because of changes in the lithology of the basal *décollement* in the foreland. This change can be generated by sedimentary variations along the strike in the initial sedimentary infill, for instance when an evaporitic layer that is viscous changes laterally to become frictional (e.g., anhydrite or clastic sediments). Such variations in basal *décollement* strength classically lead to a curvature of the deformation front and to the development of a complex transfer zone between adjacent foreland domains. Although several parameters controlling this curvature have been well documented, the structural and kinematics interaction between adjacent provinces having contrasting rheologies has received much less attention.

In order to investigate this question, we carried out a set of analogue experiments in a 60 cm wide and 90 cm long experimental box. We used medium grain-size quartz sand and a silicone polymer to model frictional and viscous natural rheologies, respectively. The boundary conditions were designed to test how fold-and-thrust belt dynamics change depending on the relative width of the adjacent viscous and purely frictional provinces. We conducted four experiments: 1) two end-member models with either a purely frictional or a viscous *décollement* across the entire model's width; and 2) two intermediate models comprising 1/3 and 2/3 of either a viscous or purely frictional *décollement*.

Deformed models indicate that regardless of the relative width of the purely frictional vs. that of the viscous province, the deformation style and kinematic of the frictional province is not impacted significantly by the adjacent viscous province. By contrast, the deformation kinematics in the viscous provinces is significantly influenced by the presence or absence of an adjacent frictional province. Indeed, deformation kinematics in the viscous province is typically "out of sequence" in the one-province end-member model having a viscous *décollement* all across its width. It becomes "in sequence" in both two-province models. Therefore, this suggests that a purely frictional province opposes the forward propagation of deformation in the adjacent viscous province (and thus "out-of-sequence") because of the lateral friction. Interestingly, no significant changes in the structural style were observed within the viscous provinces despite the changes in deformation propagation sequence.

**Mots-Clés:** Analogue modelling, fold and thrust belt, viscous *décollement*, kinematics, along strike segmentation

<sup>\*</sup>Intervenant

## Stress in the Alpine foreland – a kinematic and mechanical approach

Sandra Borderie <sup>\*ψ1</sup>, Jon Mosar <sup>1</sup>, Bertrand Maillot <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Département de Géosciences - Sciences de la Terre - Université de Fribourg - Suisse

<sup>2</sup> Laboratoire Géosciences et Environnement Cergy (GEC) - Université de Cergy Pontoise : EA4506 - France

The Alpine foreland comprises the wedge-top Molasse Basin and the Jura fold-and-thrust belt. The sedimentary cover is deformed due to the outward propagation of the Alpine orogenic wedge. Deformation roots into a major Triassic evaporitic *décollement*. In these two areas, a part of the deformation in the sedimentary cover is characterised by conjugate tear faults. Recent studies indicate that these faults could be close to failure. However, few data are available to fully constrain the state of stress of this foreland. The goal of this project is to better understand the present deformation of the Alpine foreland. To do this, we populate the current model of the studied area with mechanical parameters. We use the Optum G2 and SLAMTec softwares that apply the principles of the Limit Analysis. Optum G2 computes the stress and the velocity fields at the initiation of the deformation. SLAMTec models 2D mechanical evolutions of thrust sequences. Combining these static and kinematic approaches enables to generate models of various mechanical scenarii. Based on existing cross-sections, structural map and 3D models in the foreland, we will test various parameters such as the influence of the position and thickness of the *décollement*, the influence of basement-inherited structures, or the geometry of the known fault systems. We expect that the results will allow explaining the structural state of the Alpine foreland and will give direct information about the current stress field. These data could then be used to assess the risk linked to exploration and exploitation of natural resources.

**Mots-Clés:** Jura fold and thrust belt, Molasse basin, Stress, Mechanical modelling

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: sandra.borderie@unifr.ch

## Analogue modelling of large-slip thrust faults in salt-bearing basins: the example of the Chazuta Thrust (Huallaga Basin, Peru)

Sandra Borderie <sup>\*1</sup>, Bruno. C. Vendeville <sup>2</sup>, Fabien Graveleau <sup>2</sup>, César Witt <sup>2</sup>, Pierre Dubois <sup>3</sup>,  
Patrice Baby <sup>4</sup>, Ysabel Calderon <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Département de Géosciences - Sciences de la Terre - Université de Fribourg - Suisse

<sup>2</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - Université de Lille, CNRS : UMR8187, Université du Littoral  
Côte d'Opale - France

<sup>3</sup> Perenco - Royaume-Uni

<sup>4</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) - Institut de Recherche pour le Développement, Université Paul  
Sabatier - Toulouse 3, Observatoire Midi-Pyrénées, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5563 - France

<sup>5</sup> PERUPETRO S.A. - Pérou

The Huallaga Basin located in the Sub-Andean (North Peru) is a foreland basin where deformation involves a salt-related detachment. The basin comprises several syntectonic depocenters, one of which is the Biabo Syncline located at the back of the Chazuta Thrust, a flat-floored thrust detaching on an evaporitic layer, and that has accommodated more than 40 km of horizontal displacement. Despite such a large displacement, the hangingwall has remained remarkably intact, showing little or no internal deformation, and has transported a large volume of evaporites within the thrust sheet itself. In order to unravel the formation and evolution of the Chazuta Thrust, we conducted a series of analogue physical experiments that tested the role of various parameters (overburden thickness and geometry, occurrence of early folds, erosion of the foldbelt's front). The main goal is to investigate a system in which most of the deformation is accommodated in the frontal part of the belt (Chazuta Thrust), whereas deformation of the allochthonous thrust sheet itself remains minor. Results from our experimental investigations suggest that the three key parameters that have allowed for such a long-lived, large-slip frontal thrust to operate are (1) the wedge shape syntectonic of the sediments sourced from the hinterland, (2) the presence of the Biabo Syncline that acted as a bulldozer pushing forwards and inflating distally the evaporites, and (3) the erosion of the thrust's front that favoured a farther advance of the foldbelt's front, which thus passively carried along with it large volumes of evaporites.

**Mots-Clés:** Huallaga Basin, Chazuta Thrust, analogue modeling, strain localization, surface processes

\*Intervenant

## Datation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ des gouges de failles des zones internes de la chaîne rifaine, péninsule de Ceuta, Espagne.

Jacinthe Caillaud <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Philippe Munch <sup>2</sup>, Patrick Monie <sup>2</sup>, Olivier Grauby <sup>3</sup>, Nicolas Arnaud <sup>2</sup>, Mickael Bonno <sup>2</sup>, Emmanuelle Homonnay <sup>4</sup>, Michel Corsini <sup>4</sup>, A. Romagny <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences - UMR 8187 (LOG) – Université du Littoral Côte d'Opale, Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique – France

<sup>2</sup> Geosciences Montpellier - UMR 5243 – Université de Montpellier – France

<sup>3</sup> CINaM Aix-Marseille - UMR 7325 (CINaM) – Aix Marseille Université – France

<sup>4</sup> Géoazur - UMR 7329 (GEOAZUR) – Université de Nice Sophia-Antipolis – France

<sup>5</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTEPI) – Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7193 – France

Constituant l'extrême occidentale de l'orogénèse alpine, l'arc de Gibraltar est bordé au nord par les chaînes des Bétiques (Espagne) et au sud par celles du Rif (Maroc), toutes deux séparées à l'Est par le bassin d'Alboran. Cet arc très resserré résulte de la convergence des plaques africaine et européenne ayant engendré un retrait du slab vers l'Ouest et la mise en place de chaînes et bassins dans le domaine Alboran (e.g. Faccenna et al., 2014). L'étude présentée ici s'intéresse aux unités internes du Rif, notamment dans le secteur de Ceuta. De nombreux travaux montrent que la formation du bassin d'Alboran associé à un amincissement crustal serait à l'origine du refroidissement très rapide (Oligocène supérieur-Miocène inférieur) de ces unités profondes (e.g. Homonnay et al., 2018). Après l'exhumation de ces unités métamorphiques, de nombreux témoins de mouvements verticaux néogènes ont été identifiés. Sur le terrain, ont été repérées des failles normales et/ou décrochantes témoins d'une tectonique cassante d'âge inconnu qui peut être associée à l'exhumation finale des unités internes ou postérieure. Dans ces failles, nous avons échantillonné des gouges, matériel formé à partir des réactions minérales lors de la fracturation cassante de ces failles normales tardives. Des minéraux argileux potassiques, en particulier les illites, dominent largement la composition de ces gouges. La distinction entre les phases héritées du socle et celles néoformées est réalisée par l'étude des données cristallographiques (polytypisme) et microscopiques de ces minéraux. L'application de la méthode de datation  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  a permis de dater ce matériel et de proposer un âge compris entre ca. 18.8 et 11 Ma pour la formation des illites authigéniques. Cette tranche de temps correspond à la phase d'exhumation au cours de laquelle les unités internes recoupent la PAZ des traces de fission et la PRZ de l'hélium (Romagny, 2014). L'activité tectonique sur ces failles accommode donc l'exhumation tardive du socle rifain au cours du Miocène.

Faccenna C et al. 2014. Mantle dynamics in the Mediterranean. Rev. Geophys. 52. Homonnaya E et al. 2018. Miocene crustal extension following thrust tectonic in the Lower Sebtides units (internal Rif, Ceuta Peninsula, Spain): Implication for the geodynamic evolution of the Alboran domain. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.11.028>

**Mots-Clés:** chaîne rifaine, datation  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , minéraux argileux, DRX, MET

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>†</sup>Auteur correspondant: jacinthe.caillaud@univ-littoral.fr

## Native H<sub>2</sub> seeps in the NW Pyrenees FTB: An active Mantle-Reactor Factory

Sylvain Calassou <sup>\*1</sup>, Eric Gaucher <sup>1</sup>, Magali Collin , Emmanuel Masini <sup>1</sup>, Maxime Ducoux<sup>2</sup>,  
Guillaume Barré<sup>3</sup>, Nicolas Lefevre , Charlotte Fillon <sup>1</sup>, Sébastien Chevrot <sup>4</sup>

<sup>1</sup> TOTAL Centre Scientifique et Technique Jean Féger (CSTJF) – TOTAL - Avenue Larribau, 64018 Pau Cedex, France

<sup>2</sup> Université d'Orléans (ISTO) – CNRS : UMR7327 – Campus Géosciences Orléans, France

<sup>3</sup> GeoRessources – Université de Lorraine : EA2014 – France

<sup>4</sup> Institut de recherche en astrophysique et planétologie (IRAP) – CNRS: UMR5277, Observatoire Midi-Pyrénées,  
Université Paul Sabatier (UPS) - Toulouse III – France

The aim of this contribution is to open mind on the geo-scenario which drag and link observations in the same story. The Mauléon basin in the NW Pyrenean foothills is the scene. This French Basco-Béarnais country record one of the European largest gravimetric anomaly. This province was already investigate, and an abnormal Mantle high was proposed (Yi Wang et al. 2016)). The ECORS-Arzacq was acquired in the early 90's, and several wells drilled from the 60's to the 90's calibrate an Early Cretaceous syn-Rift and pre-Rift series. Those wells showed with very high PRV (up to 5%) values, witnesses of abnormal high temperatures (about 400°C) at the base of this basin. A very recent 3D dense passive acquisition done with the Orogen Project allowed us to shape a very high velocity body (6500-7500 m/s) just beneath the pre-syn-Rift basin consistent with the Gravity anomaly. We describe and calibrate a possible detachment where a mantle was exhumed beneath a syn-Rift basin with HT regime. The Pyrenees convergence was able to preserve here part of the inherited early cretaceous extensive margin. However this story continues today with a good relationships between the high-velocities body and the recorded local seismicity. Close to one of the main structure of this basin, we recorded a swarm of 170 earthquakes happened in three months at 4km deep. We measured with a gas analyser (GA-5000) at the vertical position of this swarm 7.5% CO<sub>2</sub> and 650 ppm of H<sub>2</sub>. We extend the Gas seeps mapping on the extensive Mauléon area and found a H<sub>2</sub> high concentration (> 1000 ppm) next to the Frontal Northern Pyrenean Thrust. The H<sub>2</sub> factory is a serpentinization active process rooted to the Mantle reactor. Is the Mantle-link local seismicity a record of an active serpentinization process? The highest Magnetic susceptibility is fitting with high velocities, and Bouguer max anomaly. We know that serpentinization could produce magnetite minerals maybe responsible of this Mag record.

The earthquake happened in the Arette village which was partially destroyed in 1967, could be link to a serpentinization active process and/or CO<sub>2</sub> degassing of this mantle body.

**Mots-Clés:** rogen, Inheritance, Serpentinization, Mantle, exhumation, seismicity, passive seismic, abiotic gas, Hydrogen.

Intervenant

## Héritage structural d'une tectonique salifère initiée par le rifting liasique dans les Alpes méridionales françaises

Naïm Célini <sup>\*ψ1</sup>, Jean-Paul Callot <sup>1</sup>, Jean-Claude Ringenbach <sup>2</sup>, Rodney Graham <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs (E2S-UPPA, Total, CNRS, LFCR-IPRA)) – Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA], Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS, TOTAL, CSTJF, Pau – France

<sup>2</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) –Pau, France

<sup>3</sup> Imperial College – Royaume-Uni

La nappe de Digne, front alpin dans la partie sud-ouest des Alpes françaises, résulte principalement de la phase compressive Mio-Pliocène et utilise le Trias Supérieur salifère comme niveau de décollement. Ce niveau salifère a toujours été considéré comme ayant une implication structurale dans les grands chevauchements alpins.

La tectonique salifère est connue dans cette partie des Alpes depuis les années 1940 et les travaux de A.F. de Lapparent. Depuis près de 80 ans cette activité salifère débutant dès le Lias a été décrite par différents auteurs dans les grands domaines alpins (limite Briançonnais-Piémontais, Briançonnais, Dauphinois). Cependant son héritage structural et le rôle joué durant l'orogenèse alpine a été en partie sous-évalué jusqu'à la réinterprétation du scénario d'évolution de la Barre de Chine proposé par Graham & al. (2012).

Nous présentons ici des données de terrain illustrant une activité du sel dès le Lias dans la région de la nappe de Digne et sur son écaille principale : l'écaille d'Authon/Valavoire. Le rifting liasique initie l'activité salifère, qui permettra de structurer les dépôts syn-rift, permettant d'expliquer les variations de lithologie et d'épaisseur intervenant sur de très courtes distances dans le Lias marnocalcaire. La distribution des structures salifères contrôle ainsi la paléogéographie du Lias. Cette activité reste importante durant le Dogger, le dépôt des "Terres Noires" étant contrôlé localement par des systèmes gravitaires en roll-over et syncliniaux de compensation. A ce stade (et de manière similaire à ce qui est connu du bassin Vocontien et des Baronnies), plusieurs diapirs atteignent le fond de la mer et pour certains développent des "flaps". Jusqu'à présent, au front de la nappe de Digne, la structure de La Robine et ses syncliniaux périphériques étaient décrits par différents auteurs comme des structures résultant de la mise en place de la nappe au Mio-Pliocène. La Robine est désormais interprétée comme étant un bassin de 25 km<sup>2</sup> isolé par des ridges et diapirs de sel dès le Sinémurien, et ses syncliniaux associés comme des dépôtcentres localisés entre des ridges de sel. Ce mini-bassin et ces dépôtcentres sont par la suite transportés par la nappe et déposés au Pliocène sur le bassin de Valensole. D'autres secteurs plus au nord comme Astoin (méga flap de Lias), Authon (roll-over syn Oxfordien) et Clamensane (chapelets de diapirs formant la rampe latérale de l'unité d'Authon/Valavoire) complètent ce schéma et décrivent une paléogéographie complexe, amplifiée par l'activité salifère.

Le but de cette présentation est d'illustrer les structures observées en les comparant avec des analogues sismiques et/ou de terrain, de montrer leur implication structurale et leur contrôle sur la sédimentation liasique. *In fine* nous proposerons une interprétation nouvelle quant à l'implication de ces structures précoces sur l'orogénèse alpine, en impliquant le travail déjà réalisé par de nombreux auteurs sur la tectonique salifère dans les Alpes.

**Mots-Clés:** Héritage structural, tectonique salifère, orogénèse alpine \*

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: celini.naim@gmail.com

## Le complexe migmatitique de Vaasa (Svécofennides, Finlande)

Francis Chopin <sup>\*ψ1,2,3</sup>, Annakaisa Korja <sup>4</sup>, Pentti Hölttä <sup>5</sup>, Toivo Korja <sup>6</sup>, Kaisa Nikkilä <sup>2</sup>,  
Mohamed Abdel Zaher <sup>7</sup>, Olav Eklund <sup>8</sup>, Osmo Tapani Rämö <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut de physique du globe de Strasbourg (IPGS) – université de Strasbourg, France

<sup>2</sup> Department of Geosciences and Geography [Helsinki] – Finlande

<sup>3</sup> Center for Lithospheric Research, Czech Geological Survey, Praha – République tchèque

<sup>4</sup> University of Helsinki – Department of Geosciences and Geography, P.O. Box 68, 00014, Finlande

<sup>5</sup> Geological Survey of Finland (GTK) – P.O. Box 96, FI-02151 Espoo, Finlande

<sup>6</sup> Exploration Geophysics, Geosciences and Environmental Engineering, Luleå University of Technology, Suède

<sup>7</sup> Geomagnetic and Geoelectric Department, National Research Institute of Astronomy and Geophysics, Cairo, Egypte

<sup>8</sup> Åbo Akademi – Department of Geology and Mineralogy, Åbo Akademi University, FI-20500 Turku, Finlande

À l'aide de données pétrostructurale, géochronologiques (U/Pb) et géophysiques (coupe MT et sismiques, carte aéromagnétiques et gravimétriques) est discuté le mode de formation d'un large complexe migmatitique au sein de l'orogène d'accrétion paléoprotérozoïque des Svécofennides (Finlande). Il est montré que les coupes sismiques et MT préservent les structures grandes échelle d'un prisme d'accrétion crustal où se développe une première foliation métamorphique jusque l'anatexie à 1.90–1.85 Ga. Le gradient métamorphique inverse est interprété comme un fluage de sédiments partiellement fondu au sein du prisme d'accrétion. L'exhumation des migmatites est perturbée par un raccourcissement latéral et se matérialise à toutes les échelles par des interférences de plis. Au centre du complexe, dans la partie la plus fondu, des dômes de diatexites et de granitoïdes se forment par instabilité mécanique à 1.7–1.6 Ga. Ce modèle régional est discuté dans un contexte plus large où le prisme d'accrétion, partiellement fondu est affecté par une tectonique de type "orocline" qui permet l'exhumation des parties les plus chaudes et fondues dans la charnière sous la forme de dômes.

**Mots-Clés:** Svécofennides, migmatites, anatexie, Paléoprotérozoïque, Finlande

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: chop1fran6@gmail.com

## Processus d'exhumation en contexte de collision : Taïwan

Clément Conand <sup>\*1</sup>, Frédéric Moutherau <sup>\*ψ1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – Observatoire Midi-Pyrénées, Université Paul Sabatier [UPS] - Toulouse III, CNRS: UMR5563 – France

L'exhumation rapide des chaînes de montagnes est attribuée à des facteurs tels que l'accrétion localisée d'unités de haut grade par sous-placage (e.g. Taiwan, Alpes), de chevauchement hors-séquence dont la dynamique est mal connue (Himalaya) et/ou la mise en place d'un flux ductile de croûte profonde (Himalaya) associée ou non une composante de déformation extensive.

Nous proposons ici d'étudier le cas de l'orogène taïwanais. Cette chaîne de montagnes est unique car il est possible d'y étudier à Terre et en Mer les processus à l'initiation de la formation d'une orogène de collision. Cette collision est le résultat de la collision entre l'arc volcanique des Philippines et la marge riftée Eurasiatique. La zone d'étude est centrée sur les métasédiments Miocènes de bas grade métamorphiques ( $T < 350^{\circ}\text{C}$ ) en contact anormal avec les unités de haut grade métamorphique ( $T > 550^{\circ}\text{C}$ ) de la chaîne centrale (Tailuko Belt et Yuli Belt) au nord.

Dans ces métasédiments miocènes, de nombreuses déformations en cisaillement simple sont observées contrairement aux déformations observables plus au sud qui sont plutôt en cisaillement pure. Les mesures de foliation et de linéation associées à cette déformation indiquent une cinématique extensive vers le SO. De plus, de nombreuses failles sont présentes à proximité de la zone de contact avec des cinématiques décrochantes associées à des cinématiques normales vers le SO.

A travers une représentation en trois dimensions de cette zone ainsi qu'une coupe parallèle à la chaîne, nous présentons les différentes déformations observées en lien avec l'exhumation des unités de plus haut grade métamorphique. Les résultats de cette étude montrent que l'exhumation de la chaîne centrale se fait probablement dans un contexte trans-extensif, avec une composante senestre concordante avec la cinématique de la zone de suture entre l'arc volcanique des Philippines et la marge Eurasienne. La composante extensive présente une orientation NE-SO parallèle à la chaîne et une cinématique majoritairement vers le SO, permettant l'exhumation des unités de haut grade sous la couverture Miocène. L'exhumation aurait donc commencé en conditions ductiles formant ainsi les foliations et les linéations associées, pour finir avec une déformation cassante associée à la mise en place des failles senestres et normales vers le SO.

Cette étude montre que l'exhumation rapide de la chaîne centrale de Taiwan est accommodée en partie par des zones de cisaillement ductile/cassant extensive. L'extension explique la différence de taux d'exhumation entre le centre et le sud de l'île à la transition entre collision mature et zone d'initiation de l'accrétion continentale.

**Mots-Clés:** collision, Taïwan, orogen, exhumation

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: [frederic.moutherau@get.omp.eu](mailto:frederic.moutherau@get.omp.eu)

## Nature de la Ceinture Orogenique Pan-africaine d'Afrique Centrale exposée dans la partie méridionale du massif du Ouaddi (Tchad oriental), sud du Métacraton du Sahara.

Félix Djerossem <sup>\*ψ1</sup>, Olivier Vanderhaghe <sup>\*1</sup>, Moussa Isseini <sup>\*2</sup>, Julien Berger <sup>\*1</sup>, Jérôme Ganne <sup>\*1</sup>, Armin Zeh <sup>\*3</sup>

<sup>1</sup> Géosciences et Environnement Toulouse (GET) - Université Paul Sabatier - Toulouse III - France

<sup>2</sup> Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland (KIT) - Allemagne

<sup>3</sup> J.W. Goethe Universität, Institut für Geowissenschaften - Altenhöferallee 1, D-60438 Frankfurt, Allemagne

L'objectif de ce travail est de discuter des contraintes structurales, métamorphiques, et géochronologiques de la partie méridionale du massif du Ouaddaï, située à la marge sud du Métacraton du Sahara et fait partie de la Ceinture Orogenique Pan-africaine d'Afrique Centrale. Cette région est dominée par des roches métasédimentaires alternées des métabasites et intrudées par des granitoïdes syntectoniques et posttectoniques. Les roches métasédimentaires sont affectées par une foliation S0 /S1-2 de direction NE-SW qui porte une linéation L1-2 plongeant faiblement vers le NW et associée à des plis isoclinaux P1 et P2 d'échelle centimétrique à hectométrique. Cette foliation est également affectée par des plis ouverts P3 de pendage peu profond vers le NW ou SE et est marquée par une schistosité de plan axial S3 faiblement à fortement pentée vers le NW. La modélisation thermodynamique basée sur les micas, permet d'estimer les conditions de pression à 4 Kbars avec une température inférieure 400 C. Trois échantillons de quartzites contiennent de grains de zircons hérités d'âges archéens, paléoprotérozoïques et pré-néoprotérozoïques. L'âge concordant de  $602 \pm 3$  Ma obtenu sur un échantillon de quartzite est interprété comme l'âge du métamorphisme. Le pluton granitique est caractérisé par un âge concordant de  $635 \pm 2,5$  Ma. Les amphibolites sont caractérisées par une signature mantellique avec un  $\epsilon_{\text{Nd}}(620 \text{ Ma})$  entre +3,9 et +3,6. Les granitoïdes syntectoniques présentent un caractère métalumineux à peralumineux de type-I et seraient issus de la différentiation d'un magma mafique, dérivé du manteau enrichi avec une contamination crustale. Leurs valeurs en  $\epsilon_{\text{Nd}}(620 \text{ Ma})$  varient de -13 à -3,5. Le leucogranite à biotite est produit par la fusion partielle d'un magma felsique d'origine crustale avec une valeur  $\epsilon_{\text{Nd}}(620 \text{ Ma})$  de -18. Les leucogranite à muscovite présentent un caractère hyperalumineux de type-S, issus de la fusion partielle des métasediments avec des valeurs  $\epsilon_{\text{Nd}}(620 \text{ Ma})$  entre -10 et -2,1. Ces données, permettent de conclure que la partie méridionale du massif du Ouaddaï, expose des roches archéennes à paléoprotérozoïques, remobilisées au cours de l'orogenèse panafricaine. Ce qui est en relation avec le modèle du Métacraton du Sahara. Cependant, nous proposons que la remobilisation de la croûte exposée au sud du Ouaddaï s'effectue par érosion du craton archéen à paléoprotérozoïque, puis déformation et métamorphisme au cours de l'Orogenèse Pan-africaine.

**Mots-Clés:** Massif du Ouaddaï, métacraton, Ceinture Orogenique panafricaine d'Afrique Centrale, remobilisation crustale

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: djerossem@gmail.com

## Carving mountains : aeolian erosion as a major factor controlling the topographic evolution in the Gobi region (Mongolia).

Dagvasuren Dovchintseren <sup>\*ψ</sup>, Marc Jolivet <sup>1</sup>, Régis Braucher<sup>φ2</sup>, Denis Virlogeux , Jean-Michel Schmitt

<sup>1</sup> Géosciences Rennes UMR 6118, Université Rennes 1 (GR) –INSU, CNRS : UMR6118 –Rennes, France

<sup>2</sup> CEREGE – CNRS : UMR7330 – Europôle Méditerranéen de l’Arbois –Aix-en-Provence, France

The Tsagaan Els Basin in SE Mongolia is a 31 000 km<sup>2</sup> endoreic depression submitted to active erosion and surface lowering. The present-day depression is superimposed to a complex pattern of Cretaceous grabens and semi-grabens separated by basement highs composed of Proterozoic to Paleozoic metamorphic and magmatic rocks (Johnson et al., 2001). The summits of those basement highs correspond to fragments of a very low relief planation surface that formed prior to the Cretaceous extension phase, most probably during the Early to middle Jurassic (Jolivet et al., 2007). The Late Cretaceous sediments largely seal the extension phase. Paleogene to Neogene sedimentation is extremely condensed, marked by numerous aeolian dune deposits and carbonated paleosols, both indicating a long-lasting arid to semi-arid climate. The Quaternary sediments are limited, mainly composed of aeolian dunes, thin alluvial deposits, patchy outcrops of shale corresponding to small ephemeral lakes, and grain-thick sheets of gravels to pebbles covering strongly winnowed surfaces. Mapping of the drainage system shows a first-order trend towards the lowest point of the basin, associated to a second-order highly complex river network associated to local base levels. Numerous river capture events are observed indicating a poorly stabilized, locally constrained drainage system. In the center of the Tsagaan Els Basin, the c.a. 55 km long, 20 km wide Dulan Ul hill corresponds to one of the basement horsts, cropping out of the Cretaceous series. This flat-topped mountain, culminating around 950 m a.s.l. and 200 m above the basin is bordered to the north by a large fan-like morphological structure carved within the Cretaceous series. Similar fan-shaped morphologies are observed on several locations within the Tsagaan Els Basin, that cannot be explained through alluvial deposits or river incisions.

In this study, we performed a detailed mapping of the displacement of the sand (that largely corresponds to the mode of wind direction) over the central part of the Tsagaan Els Basin. We show that the fan-like morphology upwind of the Dulan Ul hill is effectively related to wind-erosion carving into the Cretaceous sediments in front of the basement high. This strong aeolian erosion, associated to the occurrence of large lithological contrasts between the basement and the sedimentary series explains the complex and extremely versatile drainage network.

Johnson C.L., et al., 2001, *Sedimentary and structural records of late Mesozoic high-strain extension and strain partitioning, East Gobi basin, southern Mongolia*. Geological Society of America Memoir 194, 413-433.

Jolivet M., et al., 2007, *The Mongolian summits: An uplifted, flat, old but still preserved erosion surface*. Geology, 35, 871-874.  
doi: 10.1130/G23758A.1

**Mots-Clés:** Geomorphology, Aeolian erosion, Topographic building, Drainage system

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: dagvasuren.dovchintseren@orano.group

## The Nappe des Marbres unit of the Basque-Cantabrian belt: field data and modelling experiments of an inverted hyper-extended rift system

Maxime Ducoux <sup>\*ψ1,2</sup>, Laurent Jolivet <sup>3</sup>, Charles Gumiaux <sup>1</sup>, Thierry Baudin <sup>4</sup>, Florence Cagnard <sup>4</sup>, Emmanuel Masini <sup>2</sup>

<sup>1</sup> ISTO, Institut des Sciences de la Terre, Université d'Orléans, UMR 7327 CNRS, BRGM, France – Univ. Orléans, CNRS, BRGM, ISTO, UMR 7327, F-45071, Orléans, France – France

<sup>2</sup> Total SA, CSTJF, Avenue Larribau, 64000 Pau, France – TOTAL, CSTJF, Pau – France

<sup>3</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTeP) – Sorbonne Universités, UPMC Université Paris 6 CNRS UMR7193

<sup>4</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Orléans, France – France

A major key issue when addressing orogenic processes is to understand how the former rift architecture interacts with shortening during early stages of convergence. This problem is well exposed along the North Pyrenean Zone of the Pyrenees, where former hyper-extended rifts systems are inverted and juxtaposed to the Axial Zone. There, documenting the early stages of orogeny as well as its former rift architecture remains challenging because its geological record is strongly overprinted by later collisional deformations.

At the western termination of the Pyrenees, the Basque-Cantabrian fold and thrust belt escaped from most of the pervasive collisional deformations related to the formation of the Axial zone. There, the Nappe des Marbres Unit (NMU) corresponding to the northern deepest part of the basin preserves the pre- and syn-rift sedimentary cover of a former hyper-extended rift system. At a first order, the sedimentary record documents an overall asymmetry of the EW-elongated rift that is comparable to deformed rifts of the North Pyrenean Zone. In this study, we show that hyper-extension is recorded by the formation of minibasins going along gentle folding and salt diapirs. Along the northern limit of the unit, a late rift pervasive HT-LP metamorphism (> 550 °C following Raman spectrometry measurements) is affecting former folds above a zone of exhumed mantle. Metamorphic isograds are oblique to the main fold trends. In depth, the NMU is lying above a major salt decollement that decouples the basin from its underlying hyper-thinned crust. To explain this record, a top-basement (or a combination of several) detachment fault system is suggested to accommodate the extreme crustal thinning. But its actual geometry and kinematics remains uncertain so-far because of a lack of exposures.

The subsequent early orogeny consists in the development of a regional schistosity in a colder environment. It results from a moderate tightening of the former rift structures above the top-basement decollement. Therefore, we interpret this structural style as resulting from the inversion of the rift-related top-basement detachment system going along the "underthrusting" of hyper-extended crustal domains. Second order out-of-sequence thick-skin thrusting could correspond to a failed collisional stage. From all of the surface observations, we will use a 2D forward kinematic and isostatically balanced modelling approach in order to test and discuss the hereby proposed scenarios.

**Mots-Clés:** Pyrenees, Basque, Cantabrian Belt, Nappe des Marbres Unit, HT, LP metamorphism, superposed deformations, salt tectonic, décollement, inversion of hyper, extended rift system

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: maxime.ducoux@external.total.com

## The Tell-Rif orogenic system (Morocco, Algeria, Tunisia) and the complex heritage of the southern Tethys margin

Dominique Frizon De Lamotte <sup>\*ψ1</sup>, Rémi Leprêtre <sup>2</sup>, Oriol Gimeno Vivès <sup>2</sup>, Geoffroy Mohn <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géosciences et Environnement Cergy (GEC) – Université de Cergy Pontoise : EA4506 – Bâtiment E  
(Neuville 3.1), 4ème étage, France

<sup>2</sup> Géosciences et Environnement Cergy – Univ Cergy-Pontoise – France

The Tell-Rif (Tell in Algeria and Tunisia; Rif in Morocco) is the orogenic system fringing to the south the West Mediterranean basins. In this geodynamic frame, the Tell-Rif is interpreted as the direct result of the progressive closure of the Maghrebian Tethys until the collision between AlKaPeCa and Africa and, subsequently, the propagation of the deformation within Africa. This gives a consistent explanation for the offshore Neogene geodynamics and most authors share this simple scenario. Based on the analysis of surface and sub-surface data, we propose a reappraisal of its present-day geometry in terms of geodynamic evolution. This allows us highlighting its non-cylindrical nature resulting from both the Mesozoic inheritance and the conditions of the tectonic inversion. During the Early Jurassic, NE-SW basins developed before the establishment of an E-W transform corridor connecting the Central Atlantic Ocean with the Ligurian Tethys. The Maghrebian Tethys developed just after, as the result of the Late Jurassic-Early Cretaceous left-lateral spreading between Africa and Iberia. By the Late Cretaceous, the occurrence of several tectonic events is related to the progressive convergence of the two continents. A major pre-Oligocene (pre-35 Ma) compressional event is recorded. The existence of HP-LT metamorphic rocks associated with fragments of ophiolites in the External Metamorphic Massifs of the Eastern Rif and Western Tell shows that, at that time, the western part of the North-African margin was involved in a subduction below a deep basin belonging to the Maghrebian Tethys. At the same time, the closure of the West Ligurian Tethys through east-verging subduction led to a shift of the subduction, which jumped to the other side of AlKaPeCa involving both East Ligurian and Maghrebian Tethys. Slab rollback led to the development of the Oligo-Miocene back-arc basins of the West-Mediterranean, reworking the previous West Ligurian Tethys suture. The docking of AlKaPeCa against Africa occurred during the Late Burdigalian (17 Ma). Subsequently, the slab tearing triggered westward and eastward lateral movements that are responsible for the formation of the Gibraltar and Tyrrhenian Arcs respectively. The exhumation of the External Metamorphic Massifs occurred through tectonic underplating during the westward translation of the Alboran Domain. It resulted in the formation of both foredeep and wedge-top basins younger and younger westward. The lack of these elements in the eastern part of the systems signs a different evolution dominated by frontal accretion. In the discussion, we precisely address the origin of the non-cylindrical behavior of the orogenic system and question of the mechanisms explaining at large scale the phases of coupling/uncoupling between the major plates.

**Mots-Clés:** North Africa, West Mediterranean, Orogenic Systems, Structural Inheritance

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: Dominique.Frizon-De-Lamotte@u-cergy.fr

## Origine de la topographie des Cordillères Bétiques (Espagne) : héritage extensif miocène, inversion tardi-tortonienne et dynamique mantellique

Marianne Janowski <sup>\*1</sup>, Nicolas Loget , Nicolas Bellahsen , Cécile Gautheron , Laurent Husson , Jocelyn Barbarand , Laetitia Le Pourhiet , Bertrand Meyer

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP) – ISTEP - Institut des Sciences de la Terre de Paris UMR CNRS 7193 – France

La compétition entre les processus internes et externes contrôle l'évolution des surfaces continentales à l'échelle des temps géologiques. La topographie et le réseau de drainage actuels des Cordillères Bétiques (sud de l'Espagne) apparaissent comme transitoires (surfaces aplanies sommitales, knickpoints dans les rivières) impliquant que la réponse érosive du système géomorphologique n'a pas encore contrebalancé les dernières étapes de surrection. L'exhumation finale des zones internes, déterminée grâce au couplage des méthodes de thermochronologie basse-température traces de fission et (U-Th)/He sur apatite, montre un épisode d'aplanissement majeur de la topographie à une altitude proche du niveau marin entre ~ 17 et 8 Ma. Certaines de ces surfaces sont encore préservées de l'érosion en altitude. L'analyse quantitative du réseau de drainage (via le calcul du steepness index ) montre une incision relativement mature dans les sierras orientales initiée lors de l'inversion tardi-miocène, et une surrection régionale plus récente reliée à de la topographie dynamique. Le raccourcissement post-tortonien déterminé le long d'une coupe N-S dans les zones internes est faible (~ 5 km) tandis que la déchirure E-W de la lithosphère ibérique depuis la fin du Miocène entraîne un soutien mantellique permettant d'expliquer les hautes topographies orientales (topographie résiduelle positive > 1400 m). A l'ouest, la lithosphère ibérique subit la traction du panneau plongeant impliquant une topographie moyenne plus basse (topographie résiduelle négative de - 900 m à Gibraltar et jusqu'à - 2200 m dans le Rif). L'implication de ces processus engendre une forte composante non-isostatique de la topographie. La géométrie de la déchirure de la lithosphère ibérique permet d'expliquer l'instabilité de la ligne de partage des eaux séparant les versants atlantique et méditerranéen mise en évidence par le calcul de l'indice  $\chi$  dans les rivières. Le rajeunissement du relief bétique et la réorganisation dynamique du réseau de drainage suggère une surrection brève et récente (quelques Ma) rattachée à un fonctionnement discontinu de la déchirure de la lithosphère ibérique.

**Mots-Clés:** relief, exhumation, surfaces aplanies, dynamique fluviatile, topographie dynamique, raccourcissement

<sup>\*</sup>Intervenant

## Mantle flow and deforming continents: From India-Asia convergence to Pacific subduction

Laurent Jolivet <sup>\*1</sup>, Claudio Faccenna <sup>2</sup>, Thorsten Becker <sup>3</sup>, Magdalena Tesauro <sup>4</sup>, Pietro Sternai <sup>5</sup>,  
Pierre Bouilhol <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne Université – Sorbonne Universités, UPMC, CNRS – France

<sup>2</sup> Università Roma Tre – Italie

<sup>3</sup> UT Austin – États-Unis

<sup>4</sup> University of Trieste – Italie

<sup>5</sup> Université de Genève – Suisse

<sup>6</sup> Université de Lorraine – CNRS : UMR7358 – France

The formation of mountain belts or rift zones is commonly attributed to interactions between plates along their boundaries, but the widely distributed deformation of Asia from Himalaya to the Japan Sea and other back-arc basins is difficult to reconcile with this notion. Through comparison of the tectonic and kinematic records of the last 50 Myrs with seismic tomography and anisotropy models, we show that the closure of the former Tethys Ocean and the extensional deformation of East Asia can be best explained if the asthenospheric mantle transporting India northward, forming the Himalaya and the Tibetan Plateau, reaches East Asia where it overrides the westward flowing Pacific mantle and contributes to subduction dynamics, distributing extensional deformation over a 3000 km wide region. This deep asthenospheric flow partly controls the compressional stresses transmitted through the continent-continent collision, driving crustal thickening below the Himalayas and Tibet and the propagation of strike-slip faults across Asian lithosphere further north and east, as well as with the lithospheric and crustal flow powered by slab retreat east of the collision zone below E and SE Asia. The main shortening direction in the deforming continent between the collision zone and the Pacific subduction zones may in this case be a proxy for the direction of flow in the asthenosphere underneath, which may become a useful tool for studying mantle flow in the distant past. Our model of the India-Asia collision emphasizes the role of asthenospheric flow underneath continents and may offer alternative ways of understanding tectonic processes.

**Mots-Clés:** mantle convection, mountain belts, collision, subduction, back, arc extension, slab retreat

<sup>\*</sup>Intervenant

## Modélisation analogique d'une inversion tectonique positive : exemple de la marge continentale de l'Ardenne.

Elise Kazmierczak <sup>\*ψ1</sup>, Fabien Graveleau <sup>2</sup>, Sara Vandycke <sup>3</sup>, Bruno Vendeville <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Glaciologie, Université Libre de Bruxelles – Belgique

<sup>2</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG - UMR 8187 CNRS-Lille1-ULCO) – UFR Sciences de la Terre - Bât. SN5, F59655 Villeneuve d'Ascq, France

<sup>3</sup> Université de Mons (UMons) – 20, place du Parc, B7000 Mons, Belgique

Les mécanismes de l'inversion tectonique d'une marge passive sont souvent délicats à mettre en évidence sur le terrain en raison de l'histoire polyphasée des exemples naturels étudiés et de leurs grandes dimensions d'observation. En Ardenne belgo-française, il est possible d'observer les reliques du front septentrional de la grande chaîne de montagnes varisque, nommé " la Faille du Midi ". Cette faille majeure qui a fait chevaucher sur environ 70 kilomètres l'Allochtone Ardennais sur le Paraautochtone Brabançon est souvent interprétée comme issue de la réactivation en compression d'une paléo-marge passive structurée au Silurien-Dévonien. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la dynamique tectonique de mise en place du front nord varisque par une approche de modélisation analogique afin de tester quelques paramètres de premier ordre ayant pu influencer la mise en place de cette structure. Pour cela, nous avons construit un modèle expérimental simulant, à courte échelle de temps et d'espace et avec des matériaux naturels et synthétiques, la dynamique géologique du front ardennais. Nous avons donc pu expérimenter l'influence de la variation de plusieurs paramètres géodynamiques sur l'évolution d'une marge passive et son inversion en compression, notamment 1) le taux d'extension de la marge avant sa reprise en compression, 2) les processus de surface (érosion, sédimentation) affectant les reliefs structuraux nés de la phase de raccourcissement et 3) la nature du remplissage syn-rift. L'analyse des résultats se fait par comparaison de coupes des modèles et des coupes géologiques classiques de l'Ardenne. Les résultats obtenus illustrent comment la structuration de la marge passive en blocs basculés symétriques ou bien en systèmes de horsts et grabens impacte la géométrie finale de la marge inversée. Comme attendu, les processus de surface synorogénique et la rhéologie des couches syn-rift impactent fortement les mécanismes d'inversion tectonique de la marge passive expérimentale, ce qui suggère leur influence majeure dans la dynamique tectonique du front nord varisque. Ces résultats préliminaires sont très encourageants et invitent à davantage explorer les champs de paramètres testés ici afin de mieux cerner leur influence respective sur la dynamique d'inversion d'une marge passive, et de l'Ardenne en particulier.

**Mots-Clés:** Ardenne, Faille du Midi, inversion tectonique, modélisation expérimentale

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: elise.kazmierczak@ulb.ac.be

## Mountain building and deformation partitioning

Jacques Malavieille \*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Montpellier (GM) – CNRS : UMR5243, Université de Montpellier – France

<sup>2</sup> C.N.R.S.-M.O.S.T. France-Taiwan International Laboratory (LIA D3E) – CNRS : UMRLIAD3E – France

Many orogens on the planet results from plates convergence involving subduction of a continental margin. In such a tectonic context, the lithosphere is strongly deformed building a mountain belt generally constituted by the accretion of various units of continental crust and some remnants of the lost oceanic domain. A complex deformation characterizes crustal shortening and subsequent thickening. It involves a strong partitioning of deformation modes and kinematics, that results from 3 main processes (more often combined in a mountain belt). They are: 1) Rheologic layering of the lithosphere (brittle and ductile behavior of crustal layers, structural heritage, décollements) involving specific behaviours during deformation. 2) Subduction kinematics and geometry of continental margins (oblique convergence, shape of indenters). 3) Interaction between Tectonics and surface processes (mass transfer in the orogen).

Significant questions are addressed through observations from the Taiwan orogen and insights from analog models taking into account surface processes : What is the impact of erosion on exhumation, shape of foliations and stretching lineations ? What is the relationship between deep underplating, induced uplift and flow of crustal material during erosion (evolution of finite strain during wedge growth) ? What is the role played by décollements or weak zones in crustal deformation and what is the impact of structural heritage at different scales (for example, how to account for the early extensional history of a rifted passive continental margin) ? What is responsible for the development of underplating domains evolving through time and what induces cyclicity of basal accretion? Are synconvergence normal faults an effect of deformation partitioning and erosion? What is the impact of deformation partitioning, surface processes and stratigraphic layering (mecano-stratigraphy) on folding mechanisms? What are the relations between deformation and evolution of morphology (for example, relationships between the shape of present day drainage networks and long term partitioning of deformation)? What is the role of deformation partitioning on the location of major seismogenic faults in active mountain belts?

We propose an original view for the impact of deformation partitioning on the evolution of orogens.

**Mots-Clés:** orogens, deformation partitioning, coupling tectonics erosion, analog modeling

\*Intervenant

## Impact of erosion on large scale faulting and folding in fold and thrust belts : analogue models and case studies

Jacques Malavieille <sup>\*1,2</sup>, Clément Perrin <sup>3</sup>, Giancarlo Molli <sup>4,5</sup>, Chia-Yu Lu <sup>6,7</sup>, Stéphane Dominguez <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Montpellier (GM) – CNRS : UMR5243, Université Montpellier II – France

<sup>2</sup> Observatoire de REcherche Méditerranéen de l'Environnement (OSU OREME) – Université Montpellier 2 - Sciences et Techniques, Université de Montpellier, Centre National de la Recherche Scientifique UMS3282 – France

<sup>3</sup> IPG PARIS – IPG PARIS – France

<sup>4</sup> Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa (DST) – Via S. Maria 53 I-56126 Pisa, Italie

<sup>5</sup> Università di Pisa – Italie

<sup>6</sup> Department of Geosciences, National Taiwan University (NTU) – Taïwan

<sup>7</sup> National Taiwan University (NTU) – Taïwan

The building of fold and thrust belts (FTB) is mainly controlled by the general mechanics of continental subduction and by the interactions between tectonics and surface processes that modify wedge dynamics through material transfer. Because subduction orogens suffer large convergence, the long-term deformation is intense and generates specific structures. Among them, the way large-scale recumbent fold-nappes observed in FTB grow and evolve remains enigmatic as much as antiformal stacks of thrust units and subsequent frontal klippen. What mechanisms control large scale folding, basal accretion and its cyclicity remain an open question. Basal accretion activity is generally not constant during the long-term convergent history of orogenic wedges, alternating underthrusting of new tectonic slices with the internal deformation of the already accreted ones, or even with the migration of the underplating locus to a new place. Such a cyclical underplating behavior could promote, at a whole wedge scale, an alternate change from supercritical to subcritical taper conditions.

Deformation mechanisms, long-term kinematics and evolution of FTB submitted to erosion and/or sedimentation are studied through 2D analog experiments (figure) involving large convergence. First order parameters tested include: i) décollements and/or plastic layers interbedded at different location within analog materials; ii) synconvergence surface erosion and sedimentation.

In the experiments, weak layers, favor deformation partitioning characterized by the simultaneous development of: i) underplating domains in the inner part of the wedge (basal accretion); ii) frontal accretion where the wedge grows forward. Development of antiformal thrust stacks is controlled by underplating. Thin plastic layers promote folding processes.

Recumbent and overturned folds, with large inverted limbs, develop in shear induced asymmetric deformation regime via progressive unrolling of synclinal hinges. Surface erosion and underplating at depth induce further rotation (passive tilting) and overturning of fold limbs.

Models give insights to discuss the mechanisms responsible for the large-scale structures (i.e., antiformal nappe stacks, klippen and kilometer scale recumbent fold-nappes) encountered in several mountain belts such as the Montagne Noire (French Massif Central), the hercynian Pyrénées and Galicia belt (Spain), the Western Alps or the Northern Apennines (Italy).

**Mots-Clés:** folding, analogue modeling, surface processes, fold and thrust belts

## Jurassic paleogeography of the Tian Shan: an evolution driven by far-field tectonics and climate

Julien Morin <sup>\*1</sup>, Gloria Heilbronn <sup>2</sup>, Marc Jolivet <sup>3</sup>, Cécile Robin <sup>4</sup>, Sylvie Bourquin <sup>4</sup>, Laurie Barrier <sup>5</sup>, Yingying Jia <sup>6</sup>, Vlad Batalev <sup>7</sup>

<sup>1</sup> Université de Rennes 1 – CNRS UMR 6118 Géosciences Rennes, Université Rennes1, France – France

<sup>2</sup> CASP, West Building, Madingley Rise, Madingley Road, Cambridge, CB3 0UD, United Kingdom. – Royaume-Uni

<sup>3</sup> Université Rennes 1, CNRS – CNRS UMR 6118 Géosciences Rennes, Université Rennes1, France – France

<sup>4</sup> Université Rennes 1 – CNRS UMR 6118 Géosciences Rennes, Université Rennes1, France – France

<sup>5</sup> Institut de Physique du Globe de Paris, Sorbonne Paris Cité, Université Paris Diderot, UMR 7154 CNRS, Paris

<sup>6</sup> University of Chinese Academy of Sciences, No. 19A Yuquan Road, Beijing 100049, China. – Chine

<sup>7</sup> Research Station of the Russian Academy of Sciences, Bishkek, 720049, Kyrgyzstan. – Kirghizistan

In order to decipher the paleogeographic and large-scale tectonic evolution of the Tian Shan area, we compiled three paleogeographical maps for the late Early – early Middle Jurassic, late Middle – early Late Jurassic and the Late Jurassic - Early Cretaceous transition. During the Early to early Middle Jurassic, the topographic evolution of the Tian Shan Range was dominated by the progressive planation of a late Paleozoic to early Mesozoic relief, locally interrupted by short-lived tectonic uplift. Throughout the region, the contemporaneous sedimentation was characterized by alluvial to lacustrine deposits settled under rather humid conditions. Recurrent limited deformation events associated with strike-slip and compressive tectonics occurred during this period. We propose that the Early Jurassic evolution of the Tian Shan region was related to far-field effect of the ending Qiangtang collision while its late Early to early Middle Jurassic evolution could have been driven by the subduction-related extension affecting the Caspian - Turan domains. During the late Middle to early Late Jurassic, the planation of the Paleozoic – early Mesozoic Tian Shan Range then continued. A shift to more semi-arid conditions during the Late Jurassic is also recorded in the sedimentary series all over the region. At that time, few evidences of deformation exist in the Tian Shan or within the Caspian – Turan domains. We propose that the late Middle – early Late Jurassic corresponded to a period of relative tectonic quiescence in the area. Finally, the Late Jurassic – Early Cretaceous transition was marked by a tectonic reactivation leading to the inversion of the Yarkand – Fergana Basin and to localized relief building in the Tian Shan. This period was also characterized by the climax of the aridification. We propose that this renewed transpressive deformation phase was mainly related to the accretion of the Helmand block to the south-west, and possibly to the onset of the accretion of the Lhasa Block along the southwestern margin of Eurasia.

**Mots-Clés:** Jurassic, Tian Shan, Paleogeography, Climate, Tectonics

\*Intervenant



## Jurassic tectono-stratigraphic evolution of the Yarkand-Fergana Basin (Kyrgyz Tian Shan)

Julien Morin <sup>\*1</sup>, Marc Jolivet <sup>1</sup>, Elena Bataleva <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Rennes 1 – Univ Rennes, CNRS, Géosciences Rennes - UMR 6118, F-35000 Rennes, France – France

<sup>2</sup> Research Station of the Russian Academy of Sciences, Bishkek – Kirghizistan

Extending NW-SE from eastern Kazakhstan to western China, the Talas Fergana/Karatau fault is a major NW-SE orientated structure which has undergone multiple phases and styles of deformation from the Neoproterozoic to the Cenozoic. A peculiar period of transtensional tectonics affected this structure during the Early-Middle Jurassic leading to the formation of the South Turgay, Leontiev and Yarkand-Fergana basins. However, the kinematic of the fault and the geodynamic mechanism that led to the opening of these basins are still poorly constrained due to the lack of field data but are of major importance for the understanding of the evolution of Central Asia. The Yarkand-Fergana Basin is located at the south-western termination of the Talas Fergana/Karatau fault and contains up to 5 km of Jurassic sediments. Based on field work and on the description of several sedimentary sections we reconstructed the Jurassic tectono-sedimentary evolution of the basin. During the Early-Middle Jurassic, the Yarkand-Fergana Basin evolved in an extensional setting and was separated from the adjacent Fergana Basin by basement highs. Sedimentation consisted mainly of alluvial to lacustrine deposits settled under humid conditions. We propose that this transtensive deformation could have been mostly controlled by the far-field effects of the ending Qiangtang collision and by the subduction related extension affecting the Caspian – Turan domain. The Yarkand-Fergana was subsequently inverted during a Late Jurassic – Early Cretaceous period of transpressive reactivation of the Talas Fergana-Karatau fault leading to the deposition of extensive alluvial fan systems along the eastern margin of the Fergana Basin. We propose that this renewed transpressive deformation phase was mainly related to the accretion of the Helmand Block to the south-west, and possibly to the onset of the accretion of the Lhasa Block along the southwestern margin of Eurasia.

**Mots-Clés:** Jurassic, Tectonics, Stratigraphy, Yarkand, Fergana, Tian Shan

<sup>\*</sup>Intervenant

## Oblique convergence, indentation and roll-back tectonics in Taiwan: insights from field observations and analog models

Chia-Yu Lu <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> Department of Geosciences, National Taiwan University (NTU) - Taiwan

In Taiwan today, the subduction of the Chinese continental margin under the Philippine Sea plate results in the progressive growth of an active orogenic wedge. It is one of the best places to study the complex relationships that occur between the tectono-metamorphic processes controlling deformation (plate rheology and kinematics) and surface processes (erosion and sedimentation). In the Central Range of Taiwan, foliation and lineation traces outline the geometry and kinematics of deformation in both, the foreland and hinterland of the orogenic wedge. The foliation dip and the strain ellipsoids distribution show the fan shape of a large pop-up structure characterizing the 3D effects of oblique convergence, indentation and roll-back tectonics. On the eastern flank of the mountain range, regionally developed penetrative cleavage dips, isotope data and sedimentary structures demonstrate regional roll-back structures. Two mélange units, the Kenting and Lichi mélange are exposed at the south and east of the Central Range respectively. We present the results of 2D and 3D sandbox models designed to investigate the complex deformation characterizing the active Taiwan orogenic wedge. Experiments allow the study of interactions between tectonics and surface processes, accounting for various boundary conditions and parameters such as sedimentation, erosion, basal friction, and décollement level. They account for the development of those mélanges and roll-back structures. We then characterize the exhumation patterns, the rotation of foliation and stretching lineation and the displacement patterns induced by strain partitioning in the orogen.

**Mots-Clés:** Oblique convergence, indentation, roll, back tectonics, Taiwan, analog models.

<sup>\*</sup>Intervenant

## Structural evolution of the Haouz dorsale calcaire complex (Northern internal rif domain, Morocco)

Amine Zerdeb <sup>1</sup>, Achraf Atouabat <sup>\*</sup>, Mohamed Najib Zaghloul<sup>1/2</sup>

<sup>1</sup> 1: Abdelmalek Essaadi University, FST-Tangier-Morocco – Maroc

<sup>2</sup> Faculté des Sciences et Techniques de Tanger – Ancienne Route de l’Aéroport. BP:416.Tanger, Maroc

The Haouz *Dorsale Calcaire Complex* (HDC) in the NW Morocco constituted the former southern paleo-margin platform of the Alboran Domain and has undergone a polyphasic alpine deformation. This frontal nappe stack of the Rif Internal zones appears to be the most suitable to record a restorable positive tectonic inversion occurring during the main alpine orogenic phase. The study area is located between Tétouan and Ceuta cities where we performed a geological map at 1/10000 scale, four geological cross sections and fine macro-meso-structural analysis. These new data enable us to reconstruct the tectonic evolution of the HDC during alpine orogeny. The geological cross sections indicate an orthogonal NNW-SSE and ESE-WNW compressions with mainly positive tectonic inversion accommodated by fault-propagation-fold processes and results in type-3 Ramsay's regional interference pattern. Both reactivated previous Jurassic pre-orogenic structures, and the restored E-W balanced cross-sections reveal an average shortening rate of about 50%.

The structural analysis reveals the existence of polyphasic alpine deformations. The earliest pre-orogenic phase is characterized by ENE-WSW extension controlled by syn-sedimentary faults associated with slumps corresponding to Jurassic rifting-drifting stage. The first orogenic compressive phase is articulated in two main stages D1 and D2. The D1 stage displays NNW-SSE S/C, S/C'-type shear band structures, thrust faults and associated to F1-1 isoclinal folds locally refolded by F1-2 ones with an interference pattern type-2 of Ramsay's classification. The second compressive phase D2 can be assigned to the Ghomaride Complex stacking onto *Dorsale Calcaire Complex*, and in turn the thrust of the latter onto the Predorsalian and Flysch basin Units with an ESE-WNW shortening trend. D2A shows F2-1 refolded by F2-2 folds associated with S1 and S2 cleavage foliations. While D2B and D2C are characterized by a brittle deformation characterized by westward (W to SW) thrust faults, and subsequent eastward backthrusts (E to SE). The latest deformation recorded within the D2 phase (D2D) is marked by transverse lateral strike slip faults cutting all previous structures. Finally, the latest neotectonic deformation, recorded in this area, is characterized by left lateral strike slip faults showing N-S compression, followed by successives low-angle and high-angle normal faults which result in two extensional stages E1-1 and E1-2 oriented NNE-SSW and NNW-SSE, respectively.

**Mots-Clés:** Haouz Dorsale Calcaire, Alpine deformation, regional interference, thrust, backthrust

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>1/2</sup>Auteur correspondant: zaghloul@goelogist.com

## 2.3. Pyrénées, Téthys et Méditerranée Occidentale

## Linking deformation and microstructures to the preservation of multiple metamorphic events in the Bielsa Variscan massif (Axial Zone, Pyrenees)

Laura Airaghi <sup>\*1</sup>, Nicolas Bellahsen <sup>1</sup>, Benoît Dubacq <sup>2</sup>, Claudio Rosenberg <sup>3</sup>, Maxime Waldner <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTEPI) – Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7193 – France

<sup>2</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTEPI) – Université Pierre et Marie Curie (UPMC) – Paris VI, CNRS : UMR7193, Université Pierre et Marie Curie [UPMC] - 4, place Jussieu BP CC129 75252 PARIS CEDEX 05, France

<sup>3</sup> iSTEPI – Université Pierre et Marie Curie [UPMC] - Paris VI – France

The characterization of successive low-grade metamorphic events in the external domain of orogens is particularly challenging due to the difficult applicability of geo-thermobarometry and to the small size of minerals. This is typified by the Variscan massifs of the central Pyrenees, where Alpine-age mineral assemblages are hard to distinguish from overprinted Variscan-age assemblages.

In this contribution\* we characterize metamorphic events and associated microtextures in the Variscan Bielsa granitoid (southern border of the western Axial Zone) coupling compositional mapping of metamorphic minerals and thermobarometry. Samples were collected along three NE-SW directed profiles where nearly undeformed zones alternate with mylonitic bands.

Weakly-deformed samples preserve equigranular texture but the magmatic mineral assemblage is extensively metasomatised. Compositional maps show that biotite and amphibole break down to Fe-rich chlorite (Chl1), titanite and rutile folded within kink bands. Feldspar is sericitized. In the more deformed samples, quartz shows a variety of low-temperature (270–350°C) deformation features, including cracking, deformation lamellae and minor recrystallization by bulging. When feldspar and quartz are preserved, deformation is localized along a network of cracks crosscutting Chl1. In these fractures, a second generation of Fe-poor chlorite (Chl2) is observed. Chl2 can be associated to Fe-rich white mica (Wm2) ± monazite and allanite.

Empirical thermometry and multi-equilibrium modelling indicate crystallization temperatures for Chl1 of 300–320°C and of 250–280°C for Chl2, consistent with quartz deformation features. The Mg-Fe content of Wm2 suggests growth at ~3 kbar.

Two metamorphic events are therefore recorded in the deformed areas of the Bielsa massif. The main deformation phase – likely Alpine in age – is associated to Chl2. An early metamorphism responsible for the growth of Chl1 and the breakdown of feldspar precedes this event, weakening the crust before the onset of the compressive deformation. However Chl2 and Wm2 are only observed in fractured samples, without interconnected weak layers observed in mylonites. The nature of the deformation mechanism that operated in this Variscan massif may have controlled the preservation of successive metamorphic events. Ages will hopefully be better constrained by rutile, titanite, allanite and monazite U-Pb dating.

\*This study is part of the *Orogen* research project, a tripartite partnership between academy and industry (Total, BRGM, CNRS).

**Mots-Clés:** metamorphism, microstructures, Pyrenees, Axial Zone, pressure, temperature, Bielsa

<sup>\*</sup>Intervenant

## Impact of inherited structures on the Pyrenean inversion of the Early Cretaceous Mauléon hyper-thinned rift basin highlighted by 3D geological modelling (Western Pyrenees)

Cécile Allanic <sup>\*ψ1</sup>, Gabriel Courrioux <sup>1</sup>, Nicolas Saspiturry <sup>2</sup>, Benoît Issautier <sup>1</sup>

1 Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM) – France

2 ENSEGID – Institut polytechnique de Bordeaux – France

The North Pyrenean Zone have undergone two main thinning stages. The first extensive Permian phase affected an abnormally thick continental crust, inherited from the Hercynian orogenesis, and resulted in N-S trending narrow grabens. The second rifting phase in the Pyrenees occurred during early Cretaceous times synchronously with the formation of the *Bay of Biscay* margins, *Parentis* and *Arzacq* basins. The hyper-thinning of the *Mauléon* rift basin continental crust formed during this second event.

Despite the polyphased rifting history of *Mauléon* basin and the subsequent Pyrenean orogenesis, the *Mauléon* basin preserved the tectono-sedimentary record from its creation to its inversion. Reconstructing the current 3D geometry of the basin offers the most up to date view of the structures and allow to promulgate hypotheses on the impact of inherited rift template on tectonic inversion. We used implicit modeling algorithm implemented in GeoModeller soft- ware (c BRGM-Intrepid-Geophysics), taking into account – and mostly respect - the following dataset: (1) 1/50 000 BRGM geological maps, (2) BEPH and BSS-wells in the study area, (3) seismic interpretations (4) ~ 2500 newly acquired lithological observations and structural mea- surements (Saspiturry et al, 2018). The process of geomodeling brings out the presence of NNE-SSW crustal inherited structures essential to include in the 3D model to reproduce a coherent 3D structural pattern. Thus, to the south, the WNW-ESE trending thrusts inverting the Cretaceous rifting edge (*Eaux -Chaudes*, *Lakhoura* and *Aldudes*) appears to be segmented along these NNE-SSW trending transfer zones (respectively, *Barlanès*, *Saison* and *Saint -Jean-Pied -de-Port*). As the southern Cretaceous *Mauléon* margin, the North Pyrenean Frontal Thrust is segmented by the *Saison* structure passing westward to the *Sainte-Suzanne* Thrust. These transfer zones correspond to diffuse de- formation zones with minor strike-slip offset (less than 1 km) and do not correspond to major transform fault. They are mostly constituted of several faults in relay, creating wide deformation zones where structural measurements of stratification are often deflected or verticalized. These zones could also act as preferential emplacement for salt diapir (e.g. *Iholdy*, *Roquiague*).

We argue that the Permian inherited structural framework could precondition the pattern of later inversion. Thus, the *Mauléon* Basin is considered as a segmented pop-up structure directly resulting from the inversion of the Early Cretaceous basin margins during the Late Cretaceous – Paleogene convergence.

Acknowledgements: The authors thank Total-BRGM-INSU for their authorization to publish this work, part of the OROGEN project.

**Mots-Clés:** 3D geological modeling, Mauleon basin, inversion and transfer faults

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: c.allanic@brgm.fr

## Progressive inversion of a hyper-extended rifted margin: The central North Pyrenean Zone, France

Paul Angrand <sup>\*ψ1</sup>, Mary Ford <sup>2</sup>, Anne-Gaëlle Bader <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – CNRS : UMR5563 – France

<sup>2</sup> Université de Lorraine, ENSG – Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, UMR 7358 CNRS-UL – France

<sup>3</sup> BRGM – Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

The Aquitaine Basin is the retro-foreland basin associated with the Pyrenean orogen. It developed from Campanian to Mid-Miocene by flexure of the upper (European) plate. To the south the orogen comprises the North Pyrenean Zone, the Axial Zone, the South Pyrenean Zone and the Ebro basin on the lower (Iberian) plate. The North Pyrenean Zone is a narrow thrust belt comprising both non-metamorphic and metamorphic Triassic to mid-Cretaceous strata that record both Pyrenean shortening and Aptian-Cenomanian extension locally associated with HT/LP metamorphism. This latter zone is separated from the underlying non-metamorphic series by a basal tectonic contact along which lherzolite massifs and breccias represent remnants of a zone of exhumed mantle.

This study aims to understand the relationship between the deformation history of the central North Pyrenean Zone and the evolution of the Aquitaine foreland basin, from the initial rift architecture to the present-day structure. Based on geophysical, structural, seismic, borehole and paleotemperature data (RSCM) a new crustal cross-section of the retro-foreland system constrains the structure of the North Pyrenean Zone and the central Aquitaine Basin. The detailed foreland basin evolution is constrained by chrono- and litho-stratigraphy and subsidence analyses from the literature. The section is sequentially restored to an Early Cretaceous rift template allowing us to correlate the timing of deformation and distribution of loads with foreland basin evolution.

We propose a kinematic model for the progressive inversion of the rift system. During early convergence (Campanian-Maastrichtian) the closing of the exhumed mantle domain is associated with the thrusting of the metamorphic unit over the distal European margin to the north. This episode generated the first tectonic loading of the European lithosphere, from Campanian to Late Maastrichtian, contemporaneous with post-rift thermal subsidence. The major continental collision, from Thanetian to Mid-Miocene, associated with the emplacement of a mantle body at depth, generated a second phase of tectonic subsidence. These two events are recorded as two distinct tectonic phases in the tectonic subsidence of the Aquitaine foreland basin, separated by a quiet phase. We propose that the rift architecture has a strong influence on the deformation style of the retro-wedge and that major normal faults that delimit the rift domain are inverted during the compression.

**Mots-Clés:** hyperextended passive margin, foreland basin, Pyrenees, Aquitaine Basin, cross, section balancing, subsidence

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: paul.angrand@get.omp.eu

## Integrating intraplate deformation into plate tectonics: the Iberian kinematics

Paul Angrand <sup>\*ψ1</sup>, Frederic Moutherau <sup>2</sup>, Emmanuel Masini <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – CNRS : UMR5563 – France

<sup>2</sup> GET - Observatoire Midi-Pyrénées UMR 5563 – Université Paul Sabatier-Toulouse III - UPS - Observatoire Midi-Pyrénées 14 Avenue Edouard Belin 31400 Toulouse, France

<sup>3</sup> TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – France

Plate tectonic reconstruction is a powerful tool to study the kinematics and geodynamics of tectonic plates through time. While restoring extensional domain is a well-known method, the restoration of compressional areas remains challenging. Furthermore, intraplate deformation is a key parameter that is not considered in most of the current models, leading to inconsistencies in reconstructions. The Iberian plate has been subjected to both extensional and compressive major episodes of deformation since at least early Jurassic. While numerous studies have proposed reconstruction based on the study of the Atlantic system or the Alpine Tethys system, only a few have investigated the role and position of Iberia taking into account these two domains.

We integrate results from the OROGEN scientific project coupled with geological, geophysical, and stratigraphic data compiled from the literature in order to construct a regional and coherent geodynamic and kinematic model of the Iberian system at the onset of Africa-Iberia-Eurasia convergence in the Late Cretaceous. We propose a new model that aims to take into account the internal deformation of the Iberian plate. The Iberian plate can be divided into several rigid blocks that are connected by deformed areas. These deformed areas have been subjected to strain partitioning associated with oblique and orthogonal extension and compression to accommodate the movement of the Iberian plate.

**Mots-Clés:** Iberia, Plate tectonics, Kinematics, Intraplate deformation, OROGEN project

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: paul.angrand@get.omp.eu

## Structural and diagenetic evolution of polyphased fault zones in Urgonian carbonates (La Fare massif – SE France)

Irène Aubert <sup>\*1</sup>, Juliette Lamarche <sup>2</sup>, Philippe Léonide <sup>3</sup>, Jules Fleury <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, Coll France, CEREGE – 3 Place Victor Hugo (Case 67), 13331 Marseille Cedex 03, France - France

<sup>2</sup> Centre européen de recherche et d'enseignement de géosciences de l'environnement (CEREGE) - Aix Marseille Université, INSU, Institut de recherche pour le développement [IRD], CNRS : UMR7330 - Europôle Méditerranéen de l'Arbois - Avenue Louis Philibert - BP 80 - 13545 Aix-en-Provence cedex 4, France

<sup>3</sup> Centre européen de recherche et d'enseignement de géosciences de l'environnement (CEREGE) - Aix Marseille Université, CNRS : UMR7330 – 3 Place Victor-Hugo 13331 MARSEILLE Cedex 3, France

Fault zones have a strong impact on basin reservoir properties. They can act as drains or barriers depending of structural and diagenetic properties. During and after faults formation, fracture network and other brittle deformations form efficient fluid pathways and can lead to cementation and dissolution stages in fault zones. In the case of reactivated faults, newly develop fracture and fault systems reworking and cross-cutting preexisting structures linked to the first fault activity and potentially created new fluid pathways leading to new diagenetic processes. Hence, primary petrophysical properties of fault zones can be entirely modified during the fault reactivation. The aim of this study is to determine the flow properties evolution in fault zones through time and geodynamic context by (1) characterize the structural and diagenetic modifications linked to each fault activity and (2) determine how these modifications impact the fault zone petrophysical properties. For this purpose, we study two polyphased fault zones within La Fare anticline near Marseille resulting of several tectonic events; a mid-cretaceous uplift (Durance uplift) and two shortening (Pyreneo-Provençal and Alpine shortening). In order to characterize fault zone architecture, several methods have been used; high resolution cross-sections for Castellas fault and a 290m scan-line along the outcrop associated to photogrammetry analyses for D19 fault zones. Observation of 92 thins sections with cathodoluminescence and geochemistry analysis evidenced 11 diagenetic stages that have affected fault zones. Our study shows that fault zones formation were control by preexisting structures as D19 faults which reactivated early burial related fractures. Diagenetic results highlight that fault zone formation allowed intense fluid flow leading to cementation, karstification and dolomitization processes. Fault reactivation can lead to very heterogeneous fault zone architectures. This structural heterogeneity leads to diagenetic lateral variations that can explain the petrophysic differences observed along faults.

**Mots-Clés:** Polyphased fault zones, Carbonates, fault zone architecture, Diagenesis

<sup>\*</sup>Intervenant

## An exceptional trishear-like outcrop of fault propagation fold in the Jaca Basin

Charles Aubourg <sup>\*1</sup>, Tiphaine Boiron <sup>2</sup>, Pierre-Alexandre Grignard <sup>3</sup>, Guilhem Hoareau <sup>1</sup>,  
Jean-Paul Callot <sup>4</sup>, Cédric Bonnel <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs (E2S-UPPA, Total, CNRS, LFCR-IPRA) – Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA], CNRS : UMR5150, TOTAL – France

<sup>2</sup> Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs (LFCR) – CNRS : UMR5150 – France

<sup>3</sup> Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs (OROGEN, E2S-UPPA, Total, CNRS, LFCR-IPRA) – Université de Pau et des Pays de l'Adour - UPPA (FRANCE) – France

<sup>4</sup> Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs (E2S-UPPA, Total, CNRS, LFCR-IPRA) – Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA], TOTAL – 64013 Pau, France

In fault-propagation folds, the trishear-model is a powerful geometrical model which matches with common observation such as footwall syncline and distribution of strain gradients. Here, we present an exceptional outcrop located in the Southern Pyrenees, Aragon, Spain, in the front of a ramp-related fold. This fold bounds the southern limit of the turbiditic piggy back basin within the Jaca foreland basin. In the footwall, the cleavage develops in the sub-horizontal Hecho marls (Eocene) along a km-long profile. All stages of damage acquisition are observed when approaching the hanging wall: cleavage-free, subtle development of pencil cleavage at ~1 km from the hanging-wall, pencil cleavage and slaty cleavage. Near the inferred emergence of the thrust, a decametric footwall syncline develops. In the hanging-wall, the Ager carbonate Fm. displays a 20° dipping back limb and a gentle 10° dipping forelimb. The Hecho marls from the hanging wall display a pencil cleavage which contrasts with the intense slaty cleavage observed in the footwall. The trishear model of a fault-propagation fold provides a very good match with observed geometries. Our best model has P/S=1, apical angle=100° and shortening=2 km. In this model, the ramp is not emergent. The exposed thrust might correspond to the upper limit of the triangle zone, where simple shear is at maximum. In the footwall, the progressive reorganization of the illite fabric measured by AMS is consistent with strain gradient from a few percent to almost 60%. To check the lateral thermal gradient, we performed Raman spectroscopy measurements on 8 samples of the Hecho Marls. All samples show at first order the same peak burial temperature, in the range 160-180°C, ruling out a possible thermal gradient effect. Fluid inclusions data from calcite veins provide the same peak temperature (Th~180° C), except at a location 2 km away from the fold, where hydrothermal fluids enriched in brines up to Th~220°C have been identified. This outcrop allows 3D determination of triangular damage zone imposed by the propagation of a thrust.

**Mots-Clés:** trishear

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>✉</sup>Auteur correspondant: pierrealalexandregrignard8@gmail.com

## Déformation mylonitique crétacée dans le massif de l'Agly (Pyrénées, France) : apport couplé des marqueurs structuraux et de la pétrochronologie sur monazite.

Cyril Aumar <sup>\*ψ</sup><sup>1</sup>, Valérie Bosse <sup>1</sup>, Olivier Merle <sup>φ1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Magmas et Volcans – Université Clermont Auvergne, Campus universitaire des Cezeaux - 6 avenue Blaise Pascal, 63170 Aubière – France

La phase crétacée de rifting continental entre l'Espagne et la France a longtemps été réduite à une succession de petits bassins en pull-apart. Cependant, des études récentes, menées principalement dans les bassins sédimentaires, ont montré que l'extension crétacée s'est accomplie par l'élimination du socle mettant directement en contact le manteau sous-jacent et les sédiments pré-rift.

Afin de comprendre les mécanismes de cette extension dans le socle, nous avons entrepris une analyse multidisciplinaire (structurale, métamorphique et géochronologique) des mylonites du massif hercynien de l'Agly. Les résultats obtenus montrent que la déformation mylonitique régionale du massif de l'Agly est d'âge crétacé et non hercynien. L'amplitude temporelle déduite de l'étude géochronologique des monazites indique que cette déformation se déroule de 125 à 105 Ma. Cette déformation débute à haute température ( $> 550^\circ \text{C}$ ) et se poursuit tout au long du refroidissement jusqu'à des températures inférieures à  $200^\circ\text{C}$ . La linéation d'étirement régionale (N20) de cette déformation mylonitique est associée à des zones de cisaillement sub- horizontales, synchrones mais de sens opposés. Cette étude implique une réévaluation complète des déformations subies par le socle hercynien au cours des cycles varisque et pyrénéen successifs. Outre des implications majeures sur la compréhension du cycle pyrénéen, ce travail s'inscrit dans la problématique plus vaste des modalités d'extension de la lithosphère dans les rifts continentaux.

**Mots-Clés:** Rifting crétacé, Agly, monazite, pétro, structurale, pétrochronologie

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: [cyril.aumar@etu.uca.fr](mailto:cyril.aumar@etu.uca.fr)

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: [o.merle@opgc.fr](mailto:o.merle@opgc.fr)

## Formation du karst sous couverture du bassin du Gardon (Sud de France) : conséquences sur la géodynamique régionale

Céline Baral <sup>1</sup>, Michel Séranne <sup>\*1</sup>, Pascal Fenart <sup>2</sup>, Hubert Camus <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Montpellier - CNRS-Université de Montpellier-Université de Guadeloupe - France

<sup>2</sup> HYDROFIS - 06000 Nice - France

<sup>3</sup> CENOTE - 30900 Nîmes - France

L'approvisionnement en eau dans le sud de la France dépend fortement des connaissances sur l'architecture des réservoirs karstiques, afin de mieux contraindre les modélisations hydrologiques. Le bassin du Gardon (ou de Saint Chaptes) est un synclinal affectant les formations mésozoïques et leur couverture discordante de séries continentales paléogènes. Le bassin est traversé par le Gardon qui se perd localement, alors qu'en aval, des résurgences au niveau des affleurements de calcaires du Barrémien suggèrent des connections souterraines, en lien avec les écoulements de surface. Ainsi, le Barrémien récifal " Urgonien ", karstifié, est considéré comme un important aquifère karstique sous couverture Paléogène. Cependant, la géométrie du réservoir et ses connections sont mal connues, impliquant des incertitudes sur son fonctionnement hydrologique.

Cette étude analyse l'architecture du réservoir et de sa couverture, en utilisant des profils de sismique réflexion multitrace (pénétration > 1s TWT) acquis dans les années 90, corrélés avec des données de forages (600m) et des observations de terrain.

Les résultats préliminaires montrent les points suivants :

- Les variations d'épaisseur de l'Urgonien sont essentiellement dues à 2 phases d'érosion : la première est antérieure au Crétacé supérieur et la plus récente est postérieure au Bartonien.
- La couverture présente une discordance progressive sur le réservoir Urgonien.
- Des failles normales subméridiennes se développent pendant le Priabonien et sont restées actives à l'Oligocène.
- Le bassin du Gardon est divisé par un haut structural d'Urgonien, cohérent avec la position des pertes du Gardon.
- Les affleurements d'Urgonien présentent des intensités croissantes de l'altération, en lien avec des superpositions de phases de karstification.
- Dans l'est du bassin, masqué par la couverture Paléogène et Quaternaire, l'Urgonien, recouvert de Crétacé supérieur marneux, a été préservé de la karstification.

On propose enfin une évolution géologique séquentielle du bassin qui amène de nouvelles contraintes sur la géodynamique régionale, en particulier sur i) la formation et l'extension de l'inversion qui a affecté le sud de la France au Crétacé " moyen " ; ii) l'événement Priabonien qui a précédé le rifting de la marge du Golfe du Lion.

**Mots-Clés:** karst, réservoir, Urgonien, géodynamique, Languedoc

<sup>\*</sup>Intervenant

## Modes of crustal shortening during collision: insights from Alpine and Caledonian orogens

Nicolas Bellahsen <sup>\*1</sup>, Alexandre Boutoux <sup>1</sup>, Maxime Waldner <sup>1</sup>, Jean-Baptiste Girault <sup>1</sup>, Ella Jewison <sup>1</sup>, Raphaël Pik <sup>2</sup>, Matthias Bernet <sup>3</sup>, Claudio Rosenberg <sup>1</sup>, Loïc Labrousse <sup>1</sup>, Nicolas Loget <sup>1</sup>, Frédéric Mouthereau <sup>4</sup>

<sup>1</sup> ISTeP - Université Pierre et Marie Curie [UPMC] - Paris VI - France

<sup>2</sup> CRPG - Université de Lorraine, Université de Lorraine - France

<sup>3</sup> UJF - Université Joseph Fourier - Grenoble I - Grenoble, France

<sup>4</sup> GET - Observatoire Midi-Pyrénées UMR 5563 - Université Paul Sabatier-Toulouse III - UPS - Observatoire Midi-Pyrénées 14 Avenue Edouard Belin 31400 Toulouse, France

Collisional orogens consist of ductile-brittle wedges characterized by significant crustal shortening, Barrovian metamorphism, high relief, and foreland basins. However, despite extensive field work, analytical results, and various thermo-mechanical models, their detailed thermo-structural evolution is under-documented and not fully understood. Here, we present a synthesis of recent works and new data on both the shortening sequence and the thermal evolution of orogens such as the Western Alps, the Pyrenees, and the Scottish Caledonides. These case studies provide information on shortening dynamics for different paleo-depth in orogenic wedges.

In the Alps, geo-thermo-chronometric data (coupling of LT thermochronology, Ar/Ar and U/Pb methods, and thermobarometry) show that, after a phase of underthrusting of the European crust below the proto-orogenic wedge, a phase of iso-thermal distributed shortening occurred (during 5 to 10 Myrs) and was characterized by distributed shear zones over a distance of at least 50 km. It was followed by a phase of localized shortening characterized by frontal ramps below the external-most crystalline massifs that exhumed and cooled them and activated the subalpine fold-and-thrust belt. These data show that the underplating of a new tectonic unit in brittle ductile wedges does not occur shortly after reaching the P,T peak but after a significant time/amount of shortening.

The transient phase of distributed shortening is also observed in the Pyrenean Axial Zone: a distributed phase of exhumation is recorded in the whole Axial Zone by the LT thermochronology. It predated the main period of thrust activity associated with a more classical forward propagation. Lastly, in the Scottish Caledonides, where collisional shortening under amphibolite facies can be observed, the same kinematics seem to be documented: a long peak of temperature at around 700 C and a fast cooling event that is roughly coeval with the activity of the frontal Moine thrust.

Such results are in good agreement with the record in adjacent foreland basins. Thus, it appears that distributed (and isothermal) phases of shortening seem to be an ubiquitous behavior of the continental crust in collisional setting. It most likely attests for the crustal rheology controlled by the syn-kinematic metamorphic phases and by either the inherited thermicity and/or the syn-collisional thermal evolution.

**Mots-Clés:** orogens, Alps, Pyrenees, shortening

<sup>\*</sup>Intervenant

## Enregistrement des déformations pyrénéennes et de la transition syn à post-orogénique dans la partie est du bassin aquitain

Justine Briais <sup>\*1</sup>, Eric Lasseur <sup>2</sup>, Guillaume Baby <sup>3</sup>, Thomas Francois <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

<sup>2</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) – 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans, Cedex 2, France

<sup>3</sup> Géosciences Rennes – CNRS : UMR6118, Université de Rennes I – France

<sup>4</sup> Université Paris-Sud - Paris 11 – Université Paris-Sud - Paris 11, Université Paris-Sud - Paris 11 – France

Le bassin aquitain, retroforeland pyrénéen enregistre les déformations liées à la convergence Ibérie-Eurasie sur la période Crétacé supérieur à Paléogène. Le calendrier et le style structural des déformations du retroforeland sont relativement mal contraints. Afin de mieux contraindre la propagation de la déformation plusieurs coupes géologiques sont réalisées du Sud vers le Nord, depuis la chaîne en direction du Massif Central. Ces coupes sont réalisées à partir de puits corrélés en stratigraphie séquentielle, de données de terrains, et de sismique.

Les résultats montrent plusieurs étapes dans l'évolution du bassin aquitain :

(1) Les géométries du Crétacé supérieur montrent l'existence d'un premier bassin flexural au Campanien qui est scellé par les dépôts maastrichtiens relativement isopaques et très étendus en direction du nord.

(2) Le Paléocène n'enregistre pas de déformations significatives.

(3) Les géométries de l'intervalle Yprésien-Bartonien montrent une réponse flexurale en lien avec la croissance du prisme orogénique et une migration importante des systèmes de dépôts vers le Nord à la fin de cette période. Cette période s'achève au Bartonien avec une propagation de la déformation cassante dans l'avant-pays ; elle correspond aux chevauchements de la Montagne Noire (faille de Mazamet) et au jeu de la faille de Villefranche.

Les données thermochronologiques acquises récemment sont compatibles avec les données sédimentologiques, en particulier en Montagne Noire.

(4) Aux alentours de la limite Bartonien-Priabonien, une transgression marine est enregistrée dans le bassin de Castres impliquant un profil plat et une subsidence à grande échelle. Cet évènement marin est scellé par des dépôts priaboniens qui ont une géométrie isopaque. Cette géométrie ne montre plus de réponse flexurale liée à la charge orogénique. L'origine de cette subsidence reste méconnue. Elle pourrait être liée à la dynamique mantellique qui aboutirait à l'ouverture du golfe du lion et à l'érosion de la racine lithosphérique des Pyrénées orientales.

Il existe ainsi trois stades bien distincts dans la propagation de la déformation que sont (1) une réponse flexurale liée à la charge orogénique du Crétacé supérieur au Bartonien (phase paroxysmale) puis (2) cassante à la fin du Bartonien également enregistrée à plus grande échelle. Suite aux déformations cassantes, (3) une " relaxation des contraintes " semble s'enregistrer par une transgression marine et par une subsidence homogène à partir du Priabonien. Ce dernier stade marque la transition syn-à-post-orogénique.

Ce travail de recherche est financé par le BRGM et par TOTAL dans le cadre du projet S2S.

**Mots-Clés:** bassin aquitain, Pyrénées, déformation, orogène

\*Intervenant

## Oman belt revisited: an orogenic evolution through a rift-related point of view

Marc Buisson <sup>\*ψ1,2</sup>, Emmanuel Masini <sup>2</sup>, Maxime Ducoux <sup>2,3</sup>, Julie Tugend <sup>2,4</sup>, François Chauvet <sup>2,4</sup>,  
Mathieu Rousseau <sup>2</sup>, Sylvain Calassou <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Paul Sabatier - Toulouse 3 (UPS) – UMR 5563, Toulouse, France – France

<sup>2</sup> Total SA, CSTJF, Avenue Larribau, 64000 Pau, France – TOTAL, CSTJF, Pau – France

<sup>3</sup> Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA) – LFCR, E2S-UPPA – France

<sup>4</sup> Sorbonne Université, CNRS-INSU, ISTEPIUMR 7193, F-75005 Paris, France – CNRS, UMR 7193 ISTEPI, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France – France

Classically, a continent-continent collisional orogen results from the superimposition of different geodynamic stages across convergence. By stacking the geological records of oceanic subduction(s), continental subduction before a final collisional stage, the link between each orogenic stages with respect to the pre-orogenic setting is often masked by pervasive overprints. Rather than restoring the collisional history, this study focuses on a belt that failed to reach continental collision: the Oman belt. In this study, we compile the tectono-stratigraphic record of each alpine unit of the Oman belt and replace them back into a rifted margin template to generate a rift-related map. From this first-order mapping, we suggest that the main alpine structures have a rift-related meaning, with the following south to north juxtaposition. 1) South of the Oman frontal thrust, the Arabian proximal margin is characterized by limited syn-rift accommodation space. 2) The Sumeini unit presents an increased accommodation space recorded by slope deposits, corresponding to the Arabian crustal necking zone. 3) The Hawasina unit likely corresponds to a former hyper-thinned/volcanic crustal domain. 4) The Jabal Al Akhdar and Saih Hatah units correspond to a former continental high limiting the Hawasina basin on one side from the 5) Oman exotics possibly corresponding to the former Ocean Continent Transition (OCT). 6) The Semail Ophiolites represent a piece of the former oceanic domain. In addition to the gradual increase of the metamorphic overprint in the same trend, this rift affiliation of superposed units argue for an in-sequence activation of former rift paleogeographic limits. Considering the relative ages of the main alpine structures, we can conclude that the Oman orogeny consisted of two major tectonic phases relative to the pre-orogenic template. A first phase consists in the Cretaceous obduction of the Semail ophiolite while the distal margin including the Saih Hatah ribbon reached HP metamorphism (i.e. continental subduction). A second Cenozoic phase, consists in the subsequent inversion of the Hawasina basin and Arabian necking zone while former distal margin units gets exhumed. Our results suggest that the Oman belt stopped with the inversion of the necking zone without reaching a more mature phase of collision.

**Mots-Clés:** Oman belt, tectono, stratigraphy, rift, related map, continental subduction, Cretaceous obduction, Cenozoic collision

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: marc.buisson@univ-tlse3.fr

## From Pyrenees to the Gulf of Lion: Role of the crustal structures and of the Catalan Transfer Zone (CTZ)

Albane Canva <sup>1</sup>, Anthony Dofal <sup>1</sup>, Aurélie Peyrefitte <sup>1</sup>, Renaud Couëffé <sup>1</sup>, Frédéric Lacquement <sup>1</sup>, Agnès Maillard <sup>2</sup>, Isabelle Thinon <sup>\*ψ1</sup>

<sup>1</sup> Service géologique national (BRGM) - France

<sup>2</sup> Géosciences Environnement Toulouse - UMR 5563 - Observatoire Midi-Pyrénées, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UMR239, Université Paul Sabatier (UPS) - Toulouse III, CNRS : UMR5563 - 14 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

The OROGEN research project aims to improve the knowledge of processes involved in the dismantling of a mountain chain during rifting and with a special focus on the play of transfer zones. Reactivation of the Pyrenean structures on the Gulf of Lion margin is thus investigated by (i) the reinterpretation of seismic profiles (96LRM survey), and (ii) the reinterpretation of regional gravimetric and magnetic maps produced during the project.

The reinterpretation of several seismic lines off the Roussillon coast led to identify significant tectonic structures characterized by low dips, vergences to the SE, and apparent reverse displacement. In line with onshore Pyrenean structures, these crustal tectonic features are genetically related to rift structures of the Gulf of Lion margin (Rascasse and Canet horsts) as main normal faults defining grabens are embedded on them. The rifting structuration thus seems to be partly controlled by the reactivation of Pyrenean structures.

North to the Pyrenees Axial Zone (PAZ), offshore geometries induced by horsts and grabens reveal strong analogies with rift structures known in onshore coastal area. South to the PAZ, interpreted seismic profiles demonstrate the eastward short transition, from a domain with a thick continental crust (Albères Massif) to a domain with a thin crust. This abrupt structural change corresponds to the location of the NW-SE Catalan Transfer Zone (CTZ).

Following the CTZ to the deep offshore, a major high-amplitude and huge magnetic anomaly seems to demarcate compartments with different geophysical signals to interpret in terms of structural style and crustal features. Examination of regional gravimetric and magnetic maps should allow us to define the main segments of the margin and the major tectonic structures. Gravimetric and magnetic modelling in cross-sections should permit to constrain the structural styles and the crustal geometries on the Gulf of Lion margin.

**Mots-Clés:** Gulf of Lion, Transfer Zone, crustal structures, seismic, magnetism, gravity

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: i.thinon@brgm.fr

## Carbonatation chaude en relation spatiale et génétique avec la mise en place de basaltes durant l'exhumation mantellique Téthysienne enregistrée dans la nappe de la Platta, Alpes Suisses

Rémi Coltat \*<sup>w1</sup>, Philippe Boulvais \*<sup>1</sup>, Yannick Branquet \*<sup>1,2</sup>, Joseph Collot <sup>1</sup>, Marie-Eva Epin \*<sup>3</sup>, Gianreto Manatschal \*<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Rennes (GR) - Université de Rennes 1, OSU Rennes, CNRS : UMR6118 - France

<sup>2</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO) - Université d'Orléans, CNRS : UMR7327, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - Campus Géosciences 1A, rue de la Férollerie 45071 Orléans cedex 2, France

<sup>3</sup> Ecole et Observatoire des sciences de la terre de Strasbourg (EOSTS) - université de Strasbourg, Institut national des sciences de l'Univers, Centre National de la Recherche Scientifique : UMS830, CNRS : UMR7516 - France

Les transitions océan-continent (OCT) sont reconnues comme des environnements propices à la formation et au piégeage d'hydrocarbures. Ainsi lors des dernières décennies, de nombreuses études ont été entreprises à travers l'acquisition de données de sismique réflexion, de modélisation numérique et analogique ou encore l'étude d'analogues de terrain. Une importante découverte a été la reconnaissance de roches mantelliques exhumées par des détachements dans les parties les plus distales de certaines marges. Ces structures ressemblent à celles imitées le long des ridges océaniques au niveau des Oceanic Core Complex. Ces structures tectoniques focalisent des circulations de fluides réagissant avec de larges volumes de roches mafiques (systèmes hydrothermaux) et ultramafiques (serpentinisation, ophicalcification) et aboutissent notamment à des minéralisations spécifiques (sites de Rainbow, Lost-City, TAG sur la dorsale atlantique). Dans la nappe de la Platta (Canton des Grisons, Suisse), les serpentinites sont affectées par une carbonatation importante (ophicalcites) en relation spatiale avec un détachement Jurassique associé avec la formation de l'océan téthysien. Dans ce travail nous caractérisons d'abord d'un point de vue structural les relations entre les circulations fluides génératrices d'ophicalcites et le fonctionnement du détachement, en suite de quoi nous caractérisons par une approche pétro-géochimique, notamment en isotopes stables, les sources des fluides impliquées et les conditions de leur circulation. La carbonatation affecte les basaltes au toit du détachement ainsi que les serpentinites sous-jacentes sur quelques dizaines de mètres. Les compositions isotopiques des veines calcitiques recoupant les basaltes autant que les serpentinites sont homogènes à la fois en  $\delta^{18}\text{O}$  (autour de 16‰) et  $\delta^{13}\text{C}$  (0-1‰). Ces données sont compatibles avec un seul événement de carbonatation. Le fluide est dérivé de l'eau de mer, et génère la carbonatation à des températures entre 90 et 105 °C. La circulation des fluides est associée à l'avènement du magmatisme basaltique, dont : i) les épanchements ont fourni la charge lithostatique requise pour la réactivation de ce segment du détachement ; ii) la chaleur a déclenché l'advection de fluides, en particulier, à l'interface basalte-serpentinite. Le système de la Platta représente un "end-member" des processus de carbonatation hydrothermaux en relation avec le magmatisme dans un contexte d'exhumation mantellique.

**Mots-Clés:** Géochimie, Géologie structurale, isotopes stables, fluides, détachement, marge passive, alpes

\*Intervenant

<sup>w</sup>Auteur correspondant: remi.coltat@univ-rennes1.fr

## Amincissement crustal crétacé lors du rifting pyrénéen : une coupe crustale dans les Pyrénées orientales

Yoann Denèle <sup>\*1</sup>, Martin Motus <sup>1</sup>, Elise Nardin <sup>1</sup>, Frederic Mouthereau <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – Observatoire Midi-Pyrénées, Université Paul Sabatier [UPS] - Toulouse III, CNRS: UMR5563 – France

Les marges continentales sont les témoins de la rupture continentale. L'amélioration des techniques d'imagerie sismique en mer, en partie soutenue par l'exploration pétrolière, a permis au cours des dix dernières années des avancées spectaculaires dans notre connaissance de la géométrie et de la nature des marges continentales et donc des mécanismes d'amincissement des continents. Cependant, si notre connaissance de la déformation de la croûte supérieure, associée à la formation des bassins dans les systèmes de rifts, peut être considérée comme satisfaisante, ce n'est pas le cas pour les mécanismes de déformation de la croûte inférieure. Dans les Pyrénées l'occurrence de massifs de péridotites spatialement associés à des bassins syn-rifts crétacés souligne que le processus de rifting a abouti à la rupture continentale. Sur la base d'une étude pétrostructurale du massif Nord-pyrénéen de l'Agly et d'une étude sédimentologique et biostratigraphique des bassins périphériques, nous proposons une coupe crustale préliminaire nous invitant à restaurer qualitativement la Zone Nord-Pyrénéenne orientale. Cette coupe permet de s'intéresser aux mécanismes de déformation de la croûte inférieure et aux liens entre tectonique superficielle et tectonique profonde au cours de l'évolution du système de rift. L'évolution du système et les relations croûte profonde/croûte superficielle sont notamment contraints sur la base de l'étude d'un système de brèches tectono-sédimentaires. Nous démontrons que les différentes brèches de l'Agly et les bassins témoignent d'un événement majeur d'évolution des processus de surface au cours de l'Aptien terminal. Cet épisode se caractérise par la mise en place localisée de ces brèches, relevant d'origines diverses en fonction de leur localisation : sédimentaire au sein d'un système de graben sur le massif, tectonique et de fracturation hydraulique au niveau d'un détachement majeur affectant le socle, et karstique au sein des séries mésozoïques pré-rifts.

**Mots-Clés:** Rupture continentale, Amincissement, Détachement, Brèches, Pyrénées

<sup>\*</sup>Intervenant

## Segmented rift basin preserved in the Aquitaine foreland Basin: evidence from the Arzacq Basin

Maxime Ducoux <sup>\*#1,2</sup>, Emmanuel Masini <sup>1</sup>, Julie Tugend <sup>1,3</sup>, Magali Collin <sup>1</sup>, Sylvain Calassou <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Total SA, CSTJF, Avenue Larribau, 64000 Pau, France – TOTAL, CSTJF, Pau – France

<sup>2</sup> E2S-UPPA, IPRA-LFCR, CNRS-TOTAL, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau Cedex, France – LFCR, E2S-UPPA – France

<sup>3</sup> Sorbonne Université, CNRS-INSU, ISTEPI UMR 7193, F-75005 Paris, France – ISTEPI - UMR 7193, Laboratoire Biominéralisations et Environnements Sédimentaires – France

The partitioning of deformation through time and space and its tectono-sedimentary record in sedimentary basins represents a key issue to understand rifting processes at hyper-extended rifted margin. One approach to address these questions consists in describing and restoring rift architectures from the fossil remnants preserved in mountain belts. The Western Pyrenees represents a good case study where these processes can be studied despite some controversies on the overall rift basin architecture and the associated mechanisms including a HT rift event. We benefit from one century of oil and gas exploration that provided numerous drill-hole data associated to a good 2D and local 3D reflection seismic coverage mainly in the Aquitaine foreland Basin.

In this study, we show a new interpretation of a 3D reflection seismic dataset located at the southern part of the Aquitaine foreland Basin, north of the Pyrenean frontal thrust. At this location, seismic interpretations reveal the well-preserved architecture of the Arzacq Basin with great details. The structure of this former hyperextended rift basin is controlled by a north- vergent low-angle normal fault decoupling in Triassic salt, referred to as the Arzacq fault system (AFS). In 3D, the breakaway zone of the AFS is segmented by N20 E transfer faults, relaying the limit of the basin southward. Because of the geometry of the fault associated to the occurrence of the pre-rift Triassic décollement, the syn-tectonic sedimentary record defines an overall asymmetric syncline (a syntectonic "sag basin") associated to an Aptian to Albian southward migration of the depocenters. The end of extension occurs in Albian time in the Arzacq Basin and is recorded by an uplift of the Grand Rieu high, a topographic high between the Arzacq and Mauléon Basin further south. This uplift is tentatively correlated to a thermal uplift co-eval to mantle exhumation, alkaline magmatism and the HT-LP metamorphism recorded in the Mauléon Basin at the same time. From the tectonic and sedimentary analysis of the basin, the thermal structure of the basin archived by Vitrinite Reflectance profiles cannot be attributed to a simple burial history but represent the equivalent of the syn-rift Pyrenean HT-LP thermal event.

**Mots-Clés:** Pyrenees, Aquitaine, Arzacq Basin, 2D and 3D seismic data, segmented rift, low angle normal faults, transfer faults, décollement

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>#</sup>Auteur correspondant: maxime.ducoux@external.total.com

## Salt tectonics and minibasin growth along the Provence margin during Mesozoic: Implications for structure and kinematics of the Pyrenean-Provence fold-thrust belt, France

Nicolas Espurt <sup>\*1</sup>, Florent Wattellier <sup>1</sup>, Jean-Claude Hippolyte <sup>1</sup>, Olivier Bellier <sup>1</sup>

<sup>1</sup> CEREGE – Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRA, Coll France, CEREGE, Aix-en-Provence, France – France

The Pyrenean-Provence fold-thrust belt mainly developed during the Late Cretaceous-Eocene N-S compression, and was then deformed by Oligocene-Miocene Ligurian rifting events and Neogene to present-day Alpine compression. This complex fold-thrust belt includes deep-seated basement faults, large cover décollements, and salt tectonic structures. We present a 75 km-long balanced and restored cross section in the eastern Provence domain across the large Brignoles Salt Province where large volumes of Triassic evaporites occur. The cross section, based on field structural data and exploration well data, is used to analyze, geometrically and quantitatively, the role of Triassic evaporites on deformation of the sedimentary cover. The cross section shows evidence for diapir structures (e.g., Bandol, Belgentier, Néoules, Brignoles, Miraval) and the development of numerous minibasins (e.g., Beausset, Pilon Saint Clément, Val, Correns, Bessillons, Rognette, Montmeyan) along the European-Provence margin of the Mesozoic Pyrenean-Valais Rift. Diapirs and minibasins grew mainly during Jurassic times and probably until the early Santonian with the piercement of the Bandol structure, south of the Beausset syncline. Mini- basins are filled by carbonate platforms to basinal marls and breccias, associated with normal faulting and gravitational instabilities. Campanian-Maastrichtian synorogenic series recorded inversion of the margin during the late Cretaceous with the reactivation of the preexisting salt structures that have controlled thrust localization. Cross section balancing shows a horizontal shortening greater than 10 km in the cover, focused along the Sainte-Baume, Vins, Pontevès and Fox-Amphoux thrust systems. This shortening was fed by deep basement thrust sheets uplifting halokinetic structures.

**Mots-Clés:** Provence margin, Salt tectonics, Balanced cross section

<sup>\*</sup>Intervenant

## Inversion of a salt-rich rifted margin - the eastern termination of the Northern Pyrenees

Mary Ford <sup>\*1</sup>, Sébastien Ternois <sup>1</sup>, Antoine Crémades <sup>\*1</sup>, Jaume Vergès <sup>2</sup>, Raphaël Pik <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Lorraine, CRPG, ENSG (Université de Lorraine, CRPG) – Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, UMR 7358 CNRS-UL – France

<sup>2</sup> Institute of Earth Sciences Jaume Almera, ICTJA-CSIC, Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona, Spain – Institute of Earth Sciences Jaume Almera, ICTJA-CSIC, Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona, Spain, Espagne

The easternmost northern Pyrenean Zone represents the best-preserved (i.e. most complete) portion of the inverted European rifted margin of Aptian-Albian age. Nevertheless, plate reconstructions also indicate that the eastern Pyrenees records the highest overall convergence in the orogen. New and compiled field, paleotemperature and low temperature thermochronology (LTTC) results from the Quillan-Agly-Tuchan region are integrated with deep seismic tomography imaging of Chevrot et al. (2018) to constrain and restore a series of cross sections through the eastern termination of the North Pyrenean Zone (NPZ). We show that, as the structural grain swings anticlockwise to the east, total detectable shortening decreases in the NPZ. Pyrenean deformation style changes rapidly eastward particularly along the North Pyrenean Frontal Thrust, at least in part due to high volumes of Upper Triassic (Keuper) evaporites. The east- ward closure of the foreland basin corroborates an eastward decrease in convergence. Complex halokinetic stratal patterns and structural geometries provide new constraints on the original configuration of salt-controlled depocentres in the necking zone. A progressive basinward migration of subsidence and fault activity coincided with an increase in depocentre size. Significant erosion of abandoned blocks to the north was coeval with Early Cretaceous rift migration. Post- rift Cenomanian marine strata unconformably overlie these eroded proximal blocks. The Bas Agly and Boucheville depocentres that record syn-rift HT metamorphism lie at the distal edge of the margin, the Boucheville basin above exhumed mantle. In-situ LTTC data for the Agly Massif document two clear orogenic cooling events, Late Cretaceous and Eocene, and possibly an exhumation-related cooling event during Early Cretaceous rifting. Forward and inverse modelling show that the Massif started cooling significantly below 160°C around 75 Ma, which places it to at least 4-5 km depth by this time. Rock cooling may be due to either northward thrusting of the Agly-Salvazines crustal block onto the cooler proximal margin, a symmetrical crustal popup, or northward underplating by the distal Iberian margin. Implications of these three structural scenarios on shortening rates in the North Pyrenean Zone are discussed.

**Mots-Clés:** Pyrenees, salt tectonics, inversion, rifted margin

<sup>\*</sup>Intervenant

## Unravelling the Jurassic rifting in the Rif orogenic system (Morocco): Interactions between the Central Atlantic and Maghrebian Tethys

Oriol Gimeno Vives <sup>\*ψ1</sup>, Dominique Frizon De Lamotte <sup>1</sup>, Geoffroy Mohn <sup>1</sup>, Mohamed Najib Zaghloul <sup>2</sup>, Faouziya Haissen <sup>3</sup>, Achraf Atouabat <sup>2</sup>, Rémi Leprêtre <sup>1</sup>, Michael Nirrengarten <sup>1</sup>, Valérie Bosse <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Université Cergy Pontoise – Université Cergy-Pontoise – France

<sup>2</sup> Université Abdelmalek Essaadi – Maroc

<sup>3</sup> université hassan ii – Maroc

<sup>4</sup> Université Clermont Auvergne – Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II – France

The Rif belt (Northern Morocco) represents a key area located at the junction between the Mediterranean domain and the Central Atlantic. Although this domain suffered strong Cenozoic Alpine compression, remnants of the Mesozoic North African margin are still preserved, showing a poly-phased rifting history, with a major rift event during the Early-Middle Jurassic. We portray the Mesozoic architecture and geodynamic evolution of the North African margin preserved in the External Rif units. The final aim is to better understand the geometrical and chronological relationships between the opening of both Central Atlantic and Maghrebian Tethys. We present detailed field observations from two tectonic zones (named Mesorif and Intrarif Zones) preserving elements of different parts of the former North African distal margin. Previous studies of the Mesorif units emphasized their chaotic aspect in relation with the Cenozoic compression. In contrast, we show that this configuration is mainly the result of the Jurassic rifting stage associated with significant salt tectonics. The Mesorif exhibits several exceptional outcrops where the rifting and salt tectonic geometries are preserved. In particular, it preserved the complex lithostratigraphic association of gabbro overlaid by dismembered and discontinuous blocks of Lower Jurassic carbonate platform covered by Middle to Upper Jurassic deep-marine sediments. U-Pb zircon dating on the gabbro shows its emplacement during the Lower Jurassic (185–195 Ma). More to the north, at base of the Intrarif units, serpentinized peridotites of Beni-Malek are exposed. The top of the serpentinized mantle exhibits ophicalcites, locally associated with pervasive brittle deformation. Upper Jurassic limestones are directly overlying the mantle. Such relations suggest the exhumation of the mantle at the distal part of the North African margin at the end of the Jurassic rifting. Altogether, these observations provide critical new data for our understanding of the evolution of the western part of the North African margin and its connexions with the Moroccan Atlantic margin. A tectonic restoration, integrating the conjugate Iberian margin is finally proposed.

**Mots-Clés:** Rif, Maghrebian Tethys, Alpine Tethys, Jurassic rifting

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: oriolaff@gmail.com

## Séquençage de la déformation au sein d'un bassin d'avant-pays (Bassin de Jaca, Espagne)

Pierre-Alexandre Grignard <sup>\*1</sup>, Charles Aubourg <sup>2</sup>, Cédric Bonnel <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs (OROGEN, E2S-UPPA, Total, CNRS, LFCR-IPRA) – Université de Pau et des Pays de l'Adour - UPPA (FRANCE) – France

<sup>2</sup> Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs (E2S-UPPA, Total, CNRS, LFCR-IPRA) – Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA], CNRS : UMR5150, TOTAL – France

<sup>3</sup> Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs (LFC-R) – Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA] – IPRA, Université de Pau et des Pays de l'Amour, Avenue de l'Université, 64013 Pau, France, France

Les Pyrénées constituent un objet idéal pour qui souhaite reconstituer les différentes étapes de l'histoire d'une chaîne plissée. Le bassin d'avant-pays sud-pyrénéen de Jaca est progressivement intégré dans le prisme d'accrétion orogénique au cours de la collision continentale. Dans ce contexte, la déformation crustale se propage dans les séries sédimentaires de la couverture. Sur le versant sud des Pyrénées, ce couplage entre déformation profonde et superficielle est responsable de l'exhumation du bassin turbiditique d'Hecho. Au sud de ce sous-bassin des déformations syn-sédimentaires affectent les unités marines de l'Eocène ainsi que les séries continentales du Campodarbe (Eocène supérieur – Oligocène). De la même manière la surrection du bassin de Guarga est enregistrée par les sédiments de part et d'autre du chevauchement frontal sud-pyrénéen.

L'objectif du travail présenté ici est de reconstruire l'évolution structurale du bassin de Jaca. Nos résultats reposent sur une étude de terrain, la cartographie numérique et l'interprétation d'images sismiques. La formation Campodarbe, divisées en 3 sous-unités stratigraphiques (Montes, 1992), est un bon enregistrement de l'interaction entre la propagation des structures tectoniques et le remplissage sédimentaire. Les faciès les plus proximaux correspondant à des accumulations congolératiques associées à la mise en place de cônes alluviaux localisés sur la bordure nord du bassin et répartis sur un axe est-ouest au nord du synclinal de Guarga. Le calendrier relatif de la déformation établi à partir des données de terrain suggère la migration du développement des structures tectoniques depuis l'est vers l'ouest du bassin associée à la création de dépôts selon cette même direction. Les géométries syn-tectoniques montrent que la déformation au nord du synclinal de Guarga est de très courte longueur d'onde par rapport à l'échelle du bassin, que les vitesses de basculement sont très variables dans le temps et potentiellement liées à un découplage entre les structures profondes et superficielles par la mise en place d'un niveau de décollement dans les séries marneuses sous-jacentes.

A partir de ces observations et en s'appuyant sur les images sismiques, nous proposons un ensemble de coupes séries équilibrées qui nous permettront de discuter des mécanismes responsables du séquençage de la déformation dans le bassin d'avant pays.

**Mots-Clés:** Bassin d'avant-pays, Tectonique syn-sédimentaire, décollement superficiel

\*Intervenant

## Magmatisme d'arc calco-alcalin dans la péninsule de Ceuta (Rif interne, Espagne)

Emmanuelle Homonnay <sup>\*ψ1</sup>, Jean-Marc Lardeaux <sup>1</sup>, Michel Corsini <sup>1</sup>, Delphine Bosch <sup>2</sup>, Olivier Bruguier <sup>2</sup>, Mohamed Ouazzani-Touhami <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Géoazur (GEOAZUR) – Université Nice Sophia Antipolis (UNS), INSU, Observatoire de la Côte d’Azur, [IRD], CNRS : UMR7329 – Bât 1, 250 rue Albert Einstein Les Lucioles 1, Sophia Antipolis 06560 VALBONNE, France

<sup>2</sup> Géosciences Montpellier (GM) – CNRS : UMR5243, Université Montpellier II - Sciences et techniques – Place E. Bataillon - CC 60 34095 MONTPELLIER CEDEX 5, France

<sup>3</sup> Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, Tétouan, Maroc – Maroc

La formation de la chaîne Bético-Rifaine est considérée aujourd’hui comme le résultat d’une subduction alpine, engendrant au Miocène l’ouverture arrière-arc du bassin d’Alboran. Bien que l’évolution géodynamique de l’ouverture en arrière arc soit bien documentée, aucune expression d’arc relié à cette subduction n’a encore été révélée dans le Rif.

Dans les unités du Rif interne (Sebtides inférieures) au niveau de la péninsule de Ceuta, des sills magmatiques sont présents au sein de gneiss migmatitiques à sillimanite et biotite. Notre étude structurale, pétrologique et chronologique menée dans cette zone montre que :

1- les sills sont parallèles à la déformation principale synschisteuse présente dans les gneiss encaissants. Le cœur de sill pluricentimétrique est non déformé, et présente une texture microgrenue porphyrique, alors que les bordures montrent une orientation préférentielle des minéraux,

2- ces roches magmatiques ont une minéralogie primaire de micro-diorite à pyroxène, biotite, feldspaths et quartz et ont une signature géochimique de magmatisme d’arc calco-alcalin à shoshonitique,

3- ces roches ont subi des transformations métamorphiques secondaires à la limite des conditions des faciès des schistes verts et amphibolites, régionalement datées à 21 Ma,

4- de nouvelles datations U/Pb sur monazite dans les sills de micro-diorite ont donné un âge de  $20.64 \pm 0.19$  Ma, cohérent avec le contexte chronologique et est interprété comme l’âge de rééquilibration dans le faciès des schistes verts.

La découverte d’un magmatisme calco-alcalin fortement potassique pré-Miocene est clairement cohérente avec le contexte de subduction proposé pour l’évolution du bassin d’Alboran. Ce magmatisme est contemporain de la déformation principale régionale, développée dans les conditions du facies des granulites à 29 Ma. Dans ce contexte, les Sebtides inférieures doivent être considérées comme la plaque supérieure du système de subduction.

**Mots-Clés:** arc de Gibraltar, chaîne du Rif, arc magmatique, pétrologie, géochimie, géochronologie

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: homonnay@geoazur.unice.fr

## Tectono-sedimentary evolution of the Early Cretaceous Aquitaine sag basins

Benoît Issautier <sup>\*ψ1</sup>, Eric Lasseur <sup>1</sup>, Nicolas Saspiturry <sup>2</sup>, Isabelle Thinon <sup>1</sup>, Olivier Serrano <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) – France

<sup>2</sup> ENSEGID – Institut polytechnique de Bordeaux – France

The Lower Cretaceous is a key period of Western *Europe* since it spanned the opening of the Bay of Biscay together along the North Pyrenean Basins. Recent studies highlight the role of crustal detachment on the genesis of the adjacent asymmetric *Mauléon* and *Parentis* basins (southward and westward continuation of the *Aquitain* Basin). Similar studies have never been addressed in the Aquitanian Basin and the mechanisms responsible for the Albian basin opening are still debated. Several questions must be answered: (a) is there a Paleozoic, Triassic or Jurassic crustal inheritance? affecting the Early Cretaceous basin evolution (b) What is the thick Triassic-Hettangian evaporates role on the basin evolution., and (c) can we apply the simple shear model to those basins? This work is part of the OROGEN research This study relies on seismic interpretation and spreads in-between the North Pyrenean Thrust and the North *Aquitain* Platform. Two types of basins have been identified: salt-controlled and SAG. The SAG basins initiates during Early Cretaceous, laterally bounded by the future Aquitan Basin ridges. Yet, very rare to absent syn-sedimentary normal faults were observed. These ridges seem to be inherited from the Late Jurassic as shown by the thickness variations in the Kimmeridgian deposits. The Early Cretaceous platform unconformably overlains the Jurassic both in the SAG basins and on the ridges ; inferring a Late Jurassic age to the ridges. These SAG basins are characterized by a symmetrical morphology and the absence or minor depocenter's migration during the entire Lower Cretaceous. The Neocomian deposits onlap the SAG basins' borders, which only get connected in the Lower Aptian. Subsidence accelerates during the upper Aptian-Albian time and the depocenter is still aligned on the ante Albian trend. The central trough is filled by a marly sedimentation while the basins borders are characterized by a carbonate platform with local reef build-ups. These lower Cretaceous SAG basins deposits are regionally truncated under the Cenomanian unconformity marking what we interpret as the "post-rift unconformity". Except in the *Landes* area, salt tectonic rarely controls the sedimentation. Nevertheless the *Grenade sur Adour* salt-controlled mini-basin develops during the Albian, as shown by the thick wedge resting unconformably on the Aptian and Neocomian series. On the Audignon ridge, a sudden thickness increase and facies change occur in between the North and the South, suggesting a play of the Audignon ridge as a salt-related fault or a normal fault during Albian time. Yet because of the Pyrenean inversion, this question cannot be answered. The SAG *Aquitain* Basins is immature and does not evolve into a brittle rifted basin, as shown by the absence of structures affecting the upper-crust. This stage is quite similar to the Barremian-Aptian *Mauléon* SAG basin morphology as documented in recent studies.

**Mots-Clés:** Albian, SAG, Adour Basin, Tectono, sedimentary

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: b.issautier@brgm.fr

## Miocene evolution of the Eastern Betics: insights from an onshore-offshore integrated study of the Almeria region (SE Spain)

Marine Larrey <sup>\*ψ1</sup>, Frederic Moutherau <sup>1</sup>, Damien Do Couto <sup>2</sup>, Aurélien Virgone <sup>3</sup>,  
Veronique Miegebielle <sup>3</sup>, Emmanuel Masini <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5563 – France

<sup>2</sup> ISTEP – Université Pierre et Marie Curie (UPMC) - Paris VI – France

<sup>3</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – France

The late orogenic evolution of the Alboran region is still strongly debated. This is due to a complex superimposition of shortening, extension and magmatism events interacting with the retreating Tethyan slab across Oligocene-Miocene times. Onshore and offshore Miocene sedimentary basins of Eastern Betics result from this complex tectonic evolution. They were alternatively interpreted as resulting from EW or NS extensional processes post-dating HP units exhumation. In this study, we combine both onshore and offshore data (field geology, seismic interpretation) to interpret the main structures, the varying nature of basement and the overall Miocene tectono-sedimentary record to precise the regional tectonic scenario.

Cross-sections within the onshore Almeria basins reveal from North to South an asymmetric system made of Miocene series with HP nappes bounding-reliefs. Detailed field observations show extensional structures associated with mostly dextral shear zones and N50 and N170- trending normal faults oblique to the main structural grain. They are responsible of the HP nappes exhumation and basin development. In this area, compressional structures are restricted to minor uplift and folding, probably after or coeval with the early Messinian period (?), which leads us to the question of the relative importance of compression relative to extension in such strike-slip dominated tectonic setting.

The analysis of offshore seismic data within the Alboran domain shows a relatively well stratified crust down to 6-7 twt near the transition with the Algero-Balearic basin below a sedimentary cover with variable thickness (0-2 km). Sequence stratigraphic interpretation calibrated with the Andalucia-1 well show phyllitic meta-sediments topped by Langhian to Tortonian marls and interbedded tuffs and basaltic lavas during the Messinian period. The well-laminated appearance of the crust may be variably interpreted as related to arc magmatism and extensive stretching of Paleozoic meta-sediments currently outcropping in the Betic Cordillera as metamorphic domes. The relative role of the Mesozoic rifting, HP metamorphism overprint and Neogene Alboran extension is discussed. Using analyses of fluid factory combined with spatial and temporal distribution of sedimentary facies analyses, synthetic interpretation of onshore and offshore constraints, we bring new insights on the Miocene evolution of the Eastern Betics.

**Mots-Clés:** Miocene, Extension, Exhumation, Basin development, Eastern Betics, Onshore, Off-shore

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: marine.larrey@total.com

## Sedimentary record of the Paleogene deformation in the North Pyrenean retroforeland (Aquitaine Basin) and link to the Pyrenean orogeny.

Eric Lasseur <sup>\*1</sup>, Justine Briais <sup>1</sup>, Thierry Baudin <sup>1</sup>, François Guillocheau <sup>2</sup>, Guillaume Baby <sup>3</sup>, Isabelle Thimon <sup>1</sup>, Alexandre Ortiz <sup>3</sup>, Olivier Serrano <sup>1</sup>, Arnaud Wuilleumier <sup>1</sup>, David Malet <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) - 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans, Cedex 2, France

<sup>2</sup> Géosciences Rennes - CNRS : UMR6118, Université de Rennes I - France

<sup>3</sup> Géosciences Rennes (GR) - Université de Rennes 1, OSU Rennes - Bâtiment 15 - Université de Rennes 1 - Campus de Beaulieu - CS 74205 - 35042 Rennes Cedex - France, France

<sup>4</sup> TIGF - TIGF - Espace Volta, 40 avenue de l'Europe 64010 PAU CEDEX, France

The North Pyrenean retroforeland (Aquitaine basin) display a quite different tectonic style compared to its well known southern counterpart, and is not well known due to a lack of accurate stratigraphy and geometry at the scale of the basin. Strong efforts have been made in the recent years to improve the knowledge of the Pyrenean orogeny and Aquitaine basin. Based on the integration of more than 1000 wells and 10000 km of seismic profiles we present a synthesis of the Paleogene sedimentary record of the Aquitaine Basin. Large-scale sections, thickness and facies map at the scale of 1 My, precise the timing, intensity and distribution of the deformation. Within Cenozoic, five major tecto-sedimentary cycles are identified, 2 Paleocene cycles :

A Danian-Selandian cycle (P1), and a Thanetian one(P2)., And 3 Eocene cycles:

- An Ypresian- Lower Lutetian cycle (E1) composed of prograding deltas.
- A Lutetian- Bartonian cycle (E2) composed of mixed carbonate siliciclastic deposits.
- A Priabonian cycle (E3) marked by a large scale infilling of the basin and deposition of fine-grained continental sedimentation.

The timing of deformation is refined and confirms the occurrence of a relatively quiet period during Paleocene (Danian- Lower Thanetian) although with progressively increasing sedimentation rate, followed by a syn orogenic period during Eocene. The latter is separated in two steps:

- Firstly the development of a large-scale flexural basin during Early Eocene. Onset of (lim- ited) thrusting and fault reactivation is registered around Paleocene- Eocene boundary in the eastern part of the basin.

- Secondly a propagation of the brittle deformation in the foreland with strong inversion and thrusting in the foreland (Audignon etc.) and complete spatial reorganization of the subsidence pattern.

- A Priabonian phase of homogenous moderate subsidence during Priabonian, particularly in the eastern part of the basin.

This evolution is congruent with the southern foreland one and traduces common phases of evolution. The Ypresian- Lutetian period flexure is interpreted as the consequence of the loading by the growth of the orogenic prism that took place at that time and possibly started earlier during Paleogene. The Bartonian compressive deformation of the foreland correspond to the major phase of collision. These results were acquired during the Gaia project founded by TIGF, BRGM and Agence de l'Eau Adour/Garonne.

**Mots-Clés:** Bassin d'aquitaine, paléocène, pyrénées, bassin d'avant, pays

## Role of transfer fracture zones in post-orogenic extension (Valencia Basin / Liguro-Provençal Basin)

Agnès Maillard <sup>\*1</sup>, Isabelle Thinon <sup>2</sup>, Renaud Couëffé <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Paul Sabatier [UPS] - Toulouse III – Géosciences Environnement Toulouse (GET) – Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse III, CNRS: UMR5563 – 14 Avenue Edouard Belin 31400 Toulouse, France

<sup>2</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) –France

The role of NW-SE transfer fractures zones during the opening of the North western Mediterranean basins has been evidenced since long, mostly from seismic-reflection and magnetic data. Each of these features corresponds to basement steps controlling the progressive deepening toward the center of the Northwestern Mediterranean basin. The most important one, the North-Balearic-Fracture-Zone (NBFZ), accounts for the counterclockwise rotation of the Corsica-Sardinia block from 21 to 15 Ma (Gattaccecca et al, 2007), and separates the Valencia continental basin from the Liguro-Provençal (LP) oceanic basin. The Central Transfer Zone (CTZ) in the Valencia basin separates the SW part characterized by a huge Mesozoic basin from the NE part with volcanic basement (Maillard and Mauffret, 1999; Etheve et al., 2015). Northward, the CTZ corresponds to the large scale limit between Eastern Pyrenees relatively thick crust and the Gulf of Lion highly thinned crust (Mauffret et al., 2001; Dofal et al., 2018). New observations on deep seismic lines show that the fracture zones affect the basement below the Messinian salt, but are also highlighted by faults and deep reflexions at the base of the crust. The seismic data also show the huge magmatism linked to the transfer zones and confirm a "volcanic-type basement" around the NBFZ. This reflection free "volcanic-type crust" overlies a highly reflective lower crust and 2 undulated layered reflectors at the base (2 Mohos?). It can be divided in 2 parts: a thick crust between the CTZ and the NBFZ with possible Moho at 8 to 9 twts and the "volcanic-type" facies in good accordance with the former ESP results, a thin one between the NBFZ and the CTZ with possible Moho at 7 to 8 twt s. East of the CTZ, the "volcanic-type basement" ends. Here a 2.5 twt s thin crust with flat top consists of westward dipping reflections in the upper part, rooted in an intermediate reflective layer, another basal reflective layer could be the Moho. This crust passes laterally to the type II crustal domain of the LP basin already well shown (Moulin et al., 2015; Jolivet et al., 2015). Structure, seismic facies, thickness and depth of the crust appear then clearly different and offset on each side of the transfer zones. Three crustal domains could thus be distinguished and illustrate a SW to NE thinning different from the NW to SE thinning of the LP basin, that could be compared to the Alboran / Algerian basin W to E transition (Booth-Rea et al., 2007).

**Mots-Clés:** Transfer fractures zones, North western Mediterranean basins, Crust, Moho

\*Intervenant

## OROGEN research project integrated: new perspectives about orogeny

Emmanuel Masini <sup>\*1</sup>, Sylvain Calassou <sup>1</sup>, Thierry Baudin <sup>3</sup>, Olivier Vidal <sup>4</sup>, Isabelle Thimon <sup>3</sup>, Sébastien Chevrot <sup>6</sup>, Laurent Jolivet <sup>7</sup>, Frédéric Mouhousseau <sup>8</sup>, Gianreto Manatschal <sup>9</sup>, Team Orogen Projec

<sup>1</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) - TOTAL - France

<sup>3</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - 3 avenue C. Guillemin - BP 36009 45060 Orléans, France

<sup>4</sup> Institut des sciences de la Terre (ISTerre) - Université Joseph Fourier - Grenoble I, CNRS : UMR5275 - 38041, France

<sup>6</sup> Institut de recherche en astrophysique et planétologie (IRAP) - CNRS : UMR5277, Observatoire Midi-Pyrénées, Université Paul Sabatier (UPS) - Toulouse III -, France

<sup>7</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTE) - Sorbonne Universités, UPMC Université Paris 6, Centre national de la recherche scientifique - CNRS (France) : UMR7193 - France

<sup>8</sup> GET - Observatoire Midi-Pyrénées UMR 5563 - Université Paul Sabatier-Toulouse III - UPS - Observatoire Midi-Pyrénées 14 Avenue Edouard Belin 31400 Toulouse, France

<sup>9</sup> Université de Strasbourg - Institut de Physique du Globe de Strasbourg, UMR7516 CNRS

The Orogen project is a 5-year geosciences research program resulting from an alliance between the CNRS, the BRGM and Total. By this initiative, more than 100 European academic and industry researchers are committed to challenge our understanding of orogenic processes using the circum Iberian orogens as study examples. In this presentation we show some of the perspectives we draw from the combination of old and new seismic data, new passive seismic data, well constraints, field data and numerical modelling. One advantage of the project's playground is that all of the orogenic stages are today exposed along the Bay of Biscay – Pyrenees system. By comparing undeformed rifted margins to collisional orogenic sections, we propose a 3-stage orogenic chart that replaces alpine-type orogeny with respect to a former rift template. A first pre-collision stage consists in an early asymmetric convergence going along with continental subduction of (hyper)thinned crustal domains. Data suggest that shortening nucleates in the most mature parts of rift while overlying basins are squeezed between crustal necking zones. In examples where rift failed to break-up, the early orogenic vergence may be controlled by the inversion of former major rift structures/interfaces. Thus, early orogenic non-cylindricity may reflect rift segmentation/structural changes. During the collisional stage once hyper-extended/oceanic domains are entirely consumed by subduction orogens evolve in their more evolved stage. Conjugate margins are coupling, causing the crustal indentation while thick-skin nappe-stacking propagates beyond necking zones in thick crustal domain. Crustal thickening accelerates launching foreland basin dynamics while orogenic reliefs get higher. Then, the orogenic system tends to reach a new equilibrium between tectonic and body forces, accommodated strain, sustaining reliefs and their surface processes counterpart. Finally, two end-member cases of post-orogenic dynamic can be defined. Starting right after early orogeny and forced by lateral active collision, an orogenic system can enter in a "forced" back-arc dynamic (e.g. Gulf of Lion). It requires a mature subduction (i.e. enough for a slab-pull) and a remaining "consumable" to subduct (oceanic domain/hyper-thinned crust). The post-orogenic path following a collision, may be caused by the decrease of tectonic forces relative to body forces. This breaks the depth-surface equilibrium inherited from collision and lead to post-orogenic extension/collapse.

**Mots-Clés:** OROGEN project, Iberia, orogeny, early orogeny, collision, post, orogenic, rifting, Bay of Biscay, Gulf of Lion, Pyrenees

## Formation and deformation of hyperextended rift basins in relation with pre-kinematic salt: The example of Late Jurassic to Early Cretaceous peri-Iberian basins

Geoffroy Mohn <sup>\*1</sup>, Julie Tugend <sup>2,3</sup>, Emmanuel Masini <sup>3</sup>, Nathalie Etheve <sup>1,4</sup>, Eduard Roca <sup>5</sup>,  
Júlia Gómez-Romeu <sup>6</sup>, Dominique Frizon De Lamotte <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géosciences et Environnement Cergy (GEC) – Université de Cergy Pontoise : EA4506 – France

<sup>2</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTEPI) – Sorbonne Universités, UPMC Université Paris 6, Centre national de la recherche scientifique - CNRS (France) : UMR7193 – France

<sup>3</sup> TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – France

<sup>4</sup> Total EP – Total EP – 2 place Jean Millier, 92078 Paris La Défense, France

<sup>5</sup> Universitat de Barcelona, Institut GEOMODELS, 08028 Barcelona, – Espagne

<sup>6</sup> Department of Earth, Ocean and Ecological Sciences, University of Liverpool, Liverpool L69 3GP, – Royaume-Uni

Hyperextended rift basins and passive margins are often associated with evaporite/salt deposition before, during or after the main rift event. Although widely observed, the consequences of the occurrence of salt during the formation of hyper-extended rift basins and the implications for their subsequent reactivation remain poorly understood. The aim of this contribution is twofold (1) to investigate the evolution of hyperextended rift basins in relation with pre-kinematic salt and its controls on stratigraphic basin architecture and (2) to illustrate the inversion and reactivation style of these basins.

We focus on some of the Late Jurassic to Early Cretaceous rift basins documented within and around Iberia (Western Europe). Many of these rift basins underwent hyperextension and are characterized by the local presence of very thick evaporitic successions deposited during the Late Triassic time. Most of these rift basins were later inverted and at least partly incorporated in orogens (e.g. the North-Pyrenean Basins). A few others, such as the Parentis and Columbrets Basins located offshore of the Iberia Peninsula, are relatively well preserved and benefit from a good seismic imaging coverage and local drilling control. Such settings enable us to compare the well-preserved basins with the most reactivated ones.

The Parentis and Columbrets Basins, although spatially disconnected, share a remarkable similar first-order architecture. As a general feature, both basins show a "syncline" shape of the supra-salt sedimentary cover (pre-to post-rift sediments) above an extremely thin continental basement. Our results show that their first-order syncline-shape can be explained by the presence of pre-kinematic salt acting as a decoupling horizon during extension. A thin-skinned dismembering of the pre-rift Mesozoic cover is observed at the margins of these hyperextended basins whereas the main crustal thinning is located at its center where the thickest Late Jurassic to Early Cretaceous sediments are observed. Although inverted, the North-Pyrenean basins show similar geometries and are characterized by a general synclinal shape with major thrust faults located at the margin of the basin that likely reactivate former rift-related structures.

Eventually, the comparison between these rift basins highlights the importance of pre-kinematic salt in controlling the stratigraphic architecture of rift basins and the style of their reactivation.

**Mots-Clés:** Hyperextension, salt tectonics, Columbrets basin, North, Pyrenean basins, Parentis Basin

<sup>\*</sup>Intervenant

## Age Eocène $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ des zones de cisaillement de basse température dans la péninsule du Cap de Creus (NW Espagne). Conséquences géodynamiques

Patrick Monié <sup>\*1</sup>, Emilien Oliot <sup>2</sup>, Agathe Faucher <sup>2</sup>, Maël Allard <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Montpellier (GM) - CNRS : UMR5243 – France

<sup>2</sup> Géosciences Montpellier (GM) - Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc - France

A l'Est de la zone axiale pyrénéenne, les cisaillements mylonitiques de basse température qui affectent le socle varisque du Cap de Creus, objets d'études structurales détaillées (e.g. Carreras et al., 1977-2005; Druguet et al., 1997-2014), sont généralement attribués à la fin de l'orogénèse varisque. Cette hypothèse a été récemment remise en question par une étude géochronologique  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  qui plaide en faveur d'un âge jurassique pour ces mylonites, avec une possible réactivation tertiaire (Vissers et al., 2016). La signification de ces âges reste toutefois débattue et nous présentons ici de nouvelles données géochronologiques  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  (*in situ* et sur micas séparés) obtenues dans des zones diversement déformées situées à l'extrémité du Cap de Creus et dans les granodiorites de Rodes et de Roses. Ces nouvelles datations permettent de proposer un âge Eocène pour cette déformation mylonitique.

Au Cap de Creus, les micas issus de faciès non déformés fournissent des spectres d'âges très discordants qui témoignent d'une réouverture isotopique partielle d'origine hydrothermale post-jurassique. Dans les pegmatites mylonitiques, la datation combinée *in situ* et sur grains séparés de muscovite fournit une gamme de valeurs entre 47 et 130 Ma qui résultent d'un mélange entre micas hérités tardivarques et micas syncinétiques et qui montrent que l'âge de la déformation ne peut être jurassique. Les conditions de cette déformation (300-400 °C) restent toutefois insuffisantes pour provoquer un reset complet du système argon de la muscovite.

Au sud du Cap de Creus, la granodiorite de Roses est un intrusif varisque daté à  $291 \pm 3$  Ma (Druguet et al. 2014). Ce pluton d'échelle kilométrique est également affecté par des zones localisées mylonitiques qui résultent de processus fragiles-ductiles, favorisés par des réactions métamorphiques en présence de fluides (plagioclase-> epidote  $\pm$  muscovite, biotite mag-> biotite mét, K-feldspath-> muscovite). Trois échantillons de mylonite à ultramylonite montrent des âges  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  *in situ* très groupés entre 37 et 42 Ma alors qu'une protomylonite préserve des âges plus anciens entre 47 et 69 Ma. Ces relations déformation-recristallisation-âges  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  suggèrent très clairement un âge Eocène pour la formation des zones de cisaillement localisées dans la granodiorite de Roses, probablement contemporaines de celles du Cap de Creus. A l'échelle régionale, ces structures accommoderaient la fin de la compression pyrénéenne.

**Mots-Clés:** mylonites, Cap de Creus, géochronologie, argon, Eocène

\*Intervenant

## Processus de dolomitisation et de bréchification des carbonates jurassiques des chaînons béarnais (Pyrénées)

Geoffrey Motte <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Guilhem Hoareau <sup>1</sup>, Eric C. Gaucher <sup>2</sup>, Jean-Paul Callot <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs (E2S-UPPA, Total, CNRS, LFCR-IPRA) – Université de Pau et des Pays de l'Adour [UPPA], TOTAL - France

<sup>2</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) – Avenue Larribau 64018 Pau Cedex, France

Ce projet vise à contraindre l'origine de la dolomitisation et de la fracturation intense observées dans la partie nord-ouest des Pyrénées (chaînons béarnais), à travers une étude diagénétique et sédimentologique de brèches dolomitiques affectant des carbonates jurassiques.

Les brèches affectent localement les carbonates de plate-forme et de rampe du Jurassique moyen à supérieur. Ces derniers ont enregistré, suite à leur mise en place, une histoire tectonique complexe incluant l'hyper-amincissement crustal au Crétacé, de la déformation salifère depuis le début du jurassique, avant d'être intégrés dans l'orogénèse pyrénéenne.

L'étude diagénétique est ciblée sur des brèches situées dans les dolomies du Callovo-Oxfordien (Formation de Meillon) des chaînons de Sarrance et du Mail Arrouy et sur une zone bréchifiée dans le Tithonien du Mail Arrouy (Formation de Mano). Les observations pétrographiques (optique et cathodoluminescence) mettent en évidence une phase de dolomitisation précoce (*anhedral* et *planar-P* pour les faciès *mudstone*) généralisée sur l'ensemble des chaînons pour les plate-formes carbonatées callovo-oxfordiennes et tithoniennes. Deux autres phases de dolomitisation (*planar-e* ; *planar-s* ; baroque ou *saddle*) sont observées sur l'ensemble des brèches en remplissage de fractures et par remplacement de l'encaissant. Deux générations de calcites sont également recensées localement sur des brèches du Mail Arrouy.

La caractérisation de ces ciments en cours de réalisation (isotopie C, O par SIMS et prélèvements ponctuels et Sr ; température : microthermométrie sur inclusions fluides et D47 ; âge : U-Pb) révèlera les conditions et le timing associés à ces phases de dolomitisation et de bréchification. Nous envisageons également de distinguer si ces transformations diagénétiques sont en lien avec l'hyper-amincissement crustal crétacé associé à l'exhumation mantellique, la tectonique salifère ou résultent du raccourcissement pyrénéen.

**Mots-Clés:** Diagenèse, Dolomie, Brèche, Carbonate, Jurassique, Pyrénées, Chaînons béarnais

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>✉</sup>Auteur correspondant: geoffrey.motte@univ-pau.fr

## Expression et âge de la déformation pyrénéenne en domaine intraplaque : le cas de la déformation des Causses revisité.

Oriane Parizot <sup>\*1</sup>, Yves Missenard <sup>1</sup>, Guillaume Delpech <sup>1</sup>, Frédéric Haurine <sup>1</sup>, Jocelyn Barbarand <sup>1</sup>

1 Laboratoire GEOPS, Université Paris Sud XI, Orsay - CNRS : UMR8148 - France

L'âge et les mécanismes des déformations intraplaques sont à l'heure actuelle mal connus, alors même que ces déformations sont à l'origine de mise en circulation des fluides et de potentielles minéralisations dans les domaines affectés. Au sud du Massif Central, le domaine des Causses est situé au carrefour entre plusieurs domaines géodynamiques aux évolutions contrastées (Golfe du Lion, Pyrénées, bassins d'Aquitaine et du Sud-Est, socle du Massif Central). L'objectif de l'étude est de contraindre dans le temps le calendrier de la déformation du domaine des Causses à partir d'une analyse structurale couplée à une caractérisation géochimique et une datation de calcites de faille syn-cinématique au LA-HR-ICP-MS du laboratoire GEOPS.

Les principaux résultats obtenus concernent la phase de déformation dite "pyrénéenne", traditionnellement associée au paroxysme éocène de la déformation dans l'orogène du même nom. Nous montrons que cette déformation compressive ( $\sigma_1$  Nord-Sud) s'exprime dans un premier temps par la formation de failles décrochantes ( $\sigma_1$  et  $\sigma_3$  horizontaux) puis, dans un second temps par la formation de failles inverses. Le passage du décrochement à de l'inverse peut être expliqué par une période d'érosion d'une couverture sédimentaire post-jurassique, aujourd'hui disparue, induisant une permutation des contraintes  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$ . Les analyses réalisées sur les calcites de failles décrochantes et inverses suggèrent qu'elles proviennent d'un même fluide météorique ayant interagi avec l'encaissant. Les  $d_{13}C$  des calcites de failles inverses faiblement négatifs suggèrent un temps de résidence de ce fluide plus long que pour les failles décrochantes, un résultat cohérent avec le scénario en deux temps - décrochement précoce sous couverture, érosion, puis formation des failles inverses. La datation de calcites syn-cinématiques par la méthode U/Pb au LA-HR-ICP-MS est encore en développement, mais les premiers résultats sont encourageants. Les âges obtenus semblent indiquer que la déformation dans les Causses est significativement plus ancienne que le paroxysme éocène de la déformation pyrénéenne. La déformation intraplaque dans les Causses pourrait ainsi être le témoin des stades très précoces de la convergence Ibérie-Eurasie.

**Mots-Clés:** déformation intraplaque, Causses, Pyrénées, LA, ICP, MS

<sup>\*</sup>Intervenant

## Importance of the Landes High in the structuration of the Landes Parentis area.

Matthieu Roger <sup>\*1</sup>, Isabelle Thinon <sup>1/2</sup>, Jean-Noël Proust <sup>1</sup>, Thierry Nalpas <sup>§1</sup>

<sup>1</sup> Géoscience Rennes - Université Rennes1 - CNRS - France

<sup>2</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - BRGM - France

The "Landes-Parentis area" (LPA) is located at the transition between the eastern end of the abyssal plain of the Bay of Biscay, the Aquitaine basin to the east and the highly inverted Basque-Cantabrian basin to the south. It includes the Meso-Cenozoic Parentis basin (PB) bordered to the south by a Paleozoic high named Landes High (LH). The purpose of the study is to highlight the deformation of the Landes-Parentis area during extension from the end of Jurassic to the early Cretaceous, and then during inversion from the Upper Cretaceous onward.

To understand this evolution, we analyzed ten regional 2D seismic lines through the LPA from the coast to the oceanic crust and from the LH to the Armorican margin. We mapped the main structures and stratigraphic unconformities. Well data from the PB has been used for the age dating of the different unconformities.

The maps show that the Mesozoic cover observed in the PB extends to the foot of the continental slope while all the Jurassic and Lower Cretaceous series are absent on the LH. The LPA continental slope is structured with west dipping normal fault. Further east, the contact area between PB and LH is particularly complex. Indeed, the PB presents an asymmetry between a gentle south dipping northern flank and a steep and faulted southern flank in a direct contact with LH. The LPA is also crossed by a NW-SE to NNW-SSE oriented, sinistral accident: the Landes transfer zone (LTZ). This transfer zone seems to continue in the LH by a set of NW-SE normal faults.

East of this accident, the southern flank of the BP shows EW-oriented anticlines structures, attributed to salt ripples. The structural style shows normal faults inverted during the Tertiary and ramp anticlines. To the west, the southern flank presents two tilted blocks limited by EW-oriented crustal faults with a north-dipping normal movement. These faults affect the Triassic to Lower Cretaceous sedimentary series. They are sealed by the Upper Cretaceous to Tertiary sedimentary deposits. The structural scheme is mainly extensive.

These results show that the NW-SE direction of the LPA, oblique with respect to the main NNE-SSW transfer zones of the Pyrenees and the lateral partitioning of the local deformation are probably strongly influenced by the presence of Landes High that play the role of a rigid block.

**Mots-Clés:** margin, rift, Parentis, extension, inversion, Bay of Biscaye, seismic, pyrenees

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>1</sup>Auteur correspondant: i.thinon@brgm.fr

<sup>2</sup>Auteur correspondant: Jean-Noel.Proust@univ-rennes1.fr

<sup>§</sup>Auteur correspondant: Thierry.Nalpas@univ-rennes1.fr

## Accommodation of a compression continental crust: Analogical modeling of the Tunisian Atlas

Pierre Strzerynski <sup>\*1</sup>, Rabeb Dhifaoui <sup>1,2</sup>, Regis Mourguès <sup>1</sup>, Adel Rigane<sup>2</sup>, Claude Gourmelen

1 L.P.G - Le Mans - CNRS : UMR6112, Le Mans Université - France

2 Faculté des Sciences de Sfax [Sfax] - Tunisie

Tunisia lies at the eastern end of the Maghreb Alpine chain. It is divided into two major structural domains which belong to the outer zones: the Tellian domain in the north and the Tunisian Atlas further south. Two oceanic areas border Tunisia: the Algero-Provençal basin opened in a back arc position during the Miocene and the Ionian Sea, a relic of the Tethyan oceanic domain now subducting below the Calabria and the Mediterranean ridge.

The formation of the Maghreb alpine chain occurred during Cenozoic time. In the external zones, the deformation occurred during the Tortonian. It is characterized by the association of compressive, strike-slip and extensive structures. NE-SW oriented folds and thrusts affect the Mesozoic cover. Particularly abundant in the Tell and the North of the Atlas, these structures are more scarce towards the south where they interact with two conjugated strike-slip corridors: the Negrine-Tozeur and the N-S axis fault zones (NT & NSA FZ). Late, extensive structures compatible with directions of NE-SW then NE-SW extension are set up in the Tell and Northern Atlas zones.

The objective of this study is to replace this association of structures in a broader geological context and provide better constraints to deep-seated structures. For this, an analog modeling approach has been adopted.

The experimental device includes a 60/60 cm PVC box. It is subjected to shortening simulating the convergence between the Eurasia and Africa plates and extension in a direction orthogonal to the compression, which represents a free edge located at the level of the Mediterranean ridge. This box is filled with layers of deformable materials: sand for brittle levels, upper crust and sedimentary cover and silicone to represent the ductile levels such as lower crust and Triassic evaporates.

Several experiments were carried out by changing the initial geometry and the occurrence of free boundary. The results show that the presence of a level of detachment at the base of the sedimentary series is necessary to correctly represent the compressive and extensive structures. Similarly, a free edge perpendicular to the direction of compression allows the formation of strike-slip and conjugate structures similar to the NT & NSA FZ. These experiments suggest that the main strike-slip structures and thrusts located north of Tunisia rooted in the crust whereas normal fault to the north and reverse structure to the south of Tunisia affect only the sedimentary cover.

**Mots-Clés:** Analogical modeling, Tunisian Atlas, lateral escape

<sup>\*</sup>Intervenant

## Structure of the Mesozoic sedimentary cover of the North Aquitaine continental shelf – New results from offshore and onshore observations in the Charente region (France).

Isabelle Thinon <sup>\*ψ1</sup>, Thierry Nalpas<sup>φ2</sup>, Jean-Noël Proust <sup>3</sup>, Vanessa Elongo <sup>2</sup>, Jean Vérité <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Service géologique national (BRGM) – BRGM – France

<sup>2</sup> Université de Rennes 1 - Géosciences Rennes (UR1) – Université de Rennes 1, Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes, INSU, CNRS : UMR6118 – France

<sup>3</sup> Géosciences Rennes (GR) – Université de Rennes 1, Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes, INSU, CNRS : UMR6118 – Bâtiment 15 - Rennes, France

The North Aquitaine continental shelf is a key sector to understand the deformation of this shelf related to the rifting events of the Bay of Biscay and the orogenic Pyrenean phases that may help to understand the role of the inheritance on present day structures.

We propose a new analysis of the onshore-offshore tectonic structure of the Charente Region and the North Aquitaine shelf<sup>1</sup> based on i) aerial photographies and field measurements along the coast of the Oleron and Ré Islands and the Charente River area, and ii) a newly acquired very high resolution offshore seismic survey<sup>2</sup>. Offshore we confirm the presence of a large Mesozoic synclinal with an NW-SE axis dipping to the SE and of NE-SW lineaments segmenting the shelf. The Mesozoic sedimentary cover exhibits faults and folds with major faults showing more than 10m large throws. These faults are mainly oriented EW near the coast and NW-SE further off-shore. The same directions of faults were also observed in the Cenozoic formations of the South Brittany shelf. Onshore, the analysis of field measurements and aerial photographies show the extensive occurrence of normal faults oriented in an EW direction and strike slip faults oriented in NW-SE and NE-SW directions associated with folds.

This preliminary structural study provides information on the distribution of structures, style and timing of deformations in the Charentes area induced both by the Biscay rifting, with creation of extensive structures, and/or the orogenic Pyrenean phase that is certainly associated with strike-slip displacement.

<sup>1</sup> The present-day study have been realised in the framework of the OROGEN project (TOTAL, BRGM, INSU-CNRS).

<sup>2</sup> Very High Resolution seismic network: seismic profiles of GEOVEND05 (2005), GEOVEND06 (2006), SYRRE (2014) cruises mainly acquired in scientific collaboration with Geosciences Rennes laboratory and in the framework of the RGF-Plateau continental (BRGM).

**Mots-Clés:** Mesozoic sedimentary cover, North Aquitaine continental shelf, deformation, inheritance

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: [i.thinon@brgm.fr](mailto:i.thinon@brgm.fr)

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: [Thierry.Nalpas@univ-rennes1.fr](mailto:Thierry.Nalpas@univ-rennes1.fr)

## Influence of rift-inheritance on mountain building processes: a point of view based on the Western Pyrenees and Western Alps

Julie Tugend <sup>\*ψ1,2</sup>, Geoffroy Mohn <sup>3</sup>, Emmanuel Masini <sup>2</sup>, Gianreto Manatschal <sup>4</sup>, Sébastien Chevrot <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTEPI) – Sorbonne Universités, UPMC Université Paris 6, Centre national de la recherche scientifique - CNRS (France) : UMR7193 – France

<sup>2</sup> TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – France

<sup>3</sup> Laboratoire Géosciences et Environnement Cergy (GEC) – Université de Cergy Pontoise : EA4506 – France

<sup>4</sup> Institut de physique du globe de Strasbourg (IPGS) – université de Strasbourg, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7516 – France

<sup>5</sup> Institut de recherche en astrophysique et planétologie (IRAP) – CNRS : UMR5277, Observatoire Midi-Pyrénées, Université Paul Sabatier (UPS) - Toulouse III – OBSERVATOIRE MIDI-PYRENEES - 14, avenue Edouard Belin - 31400 TOULOUSE, France

This contribution aims to investigate the influence of rift-inheritance on subduction/collisional processes at Alpine-type orogens. We focus on the Western Pyrenees and Western Alps as both benefited from new constraints on their deep structure derived from 2D tomographic models and full-waveform inversions of P waves. In spite of different deformation histories during convergence, these geophysical transects across both orogens reveal an overall comparable architecture, imaging the orogenic root and indenter. Despite uncertainties on the initial width of the two pre-orogenic systems, their former rift architecture shared many first-order similarities, including extremely thin continental crust, exhumed subcontinental mantle and minor magmatic additions. We compiled regional maps and built geological cross-sections highlighting the sampling of hyperextended domain remnants in internal parts of both orogens, including an additional orogeny-related metamorphic overprint in the Western Alps. Subsurface geology combined with geophysical transect interpretations show that former rift basins are intensively deformed in the orogenic wedge in the pro-wedge side whereas they can be preserved in the external domains of the retro-wedge side.

The interpretation of the structure of both orogens highlights the importance of rift-inherited decoupling levels in building and shaping the final architecture of both Alpine-type orogens. In present-day magma-poor rifted margins, the nature of decoupling levels evolves oceanwards, providing potential inherited rheological weaknesses at different depths between proximal and distal domains that may control the location of inversion onset and buttress formation. The embrittlement of extremely thin continental crust and serpentinization of the exhumed mantle seem to control the early convergence stage. Because of this crustal embrittlement, no decoupling prevails between the upper and lower crust whereas the serpentinization of the underlying mantle may represent the main decoupling interface at this stage. Eventually, we show that the role of indenters/buttresses during collision is likely comparable between the Western Alps and Pyrenees, controlling the overall present-day deep structure and final stage of mountain building.

**Mots-Clés:** Orogen, Inheritance, Collision, Western Pyrenees, Western Alps

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: julie.tugend@sorbonne-universite.fr

## Analyse de la déformation à la transition entre une orogénèse et un rifting : le Priabonien dans la région Languedocienne

Justine Villard <sup>\*1</sup>, Michel Séranne <sup>1</sup>, Renaud Couëffé <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Géosciences-Montpellier (GM) - CNRS-Université de Montpellier-Université de Guadeloupe - France

<sup>2</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) - 3 avenue Claude Guillemin 45060 Orléans cedex 2, France

La région Languedoc est modelée par une succession de deux événements majeurs qui se sont succédés au Tertiaire: (1) Une compression N-S associée à l'orogénèse Pyrénéenne, du Crétacé terminal jusqu'au Bartonien et (2) une extension NW-SE reliée au rifting du Golfe du Lion, en lien avec le roll-back de la subduction en Méditerranée nord-occidentale, du Rupélien supérieur jusqu'à l'Aquitainien. Cette étude a pour objectif la caractérisation de la transition entre ces deux événements.

Une mise à jour des données biostratigraphiques régionales a permis de mettre en évidence l'appartenance au Priabonien de certains dépôts continentaux, mal datés, affleurant dans les bassins Nord Montpelliérains (Bassins des Matelles, de Guzargues, de Montferrier, de Saint Martin de Londres). Le Priabonien correspond à la période critique de transition entre l'orogénèse et le rifting. Une étude tectono-sédimentaire a été menée sur les affleurements languedociens présentant des discordances progressives, et complétée par une analyse des données de sismique réflexion disponibles sur le Languedoc.

Cette étude nous apporte plusieurs éléments : (1) Les dépôts Priabonien sont dans une disposition syn-tectonique compressive le long de chevauchement E-W. (2) Les dépôts Priabonien sont dans une disposition syn-tectonique compatible avec une extension NW-SE le long de failles orientées NE-SW, présentant localement des déformations compressives du bloc de toit associé localement à de la compression NE-SW. (3) Cette séquence sédimentaire est identifiable en sismique de part sa disposition entre les unités correspondant au syn-rift et les unités correspondant au syn-orogénique. Ils se concentrent dans les zones où les failles bordières ont une orientation N-S (releasing bend). Ces éléments mènent à penser une déformation globale en décrochement sénestre, en lien à une extension E-W au Priabonien. En termes de contrainte, cela implique une permutation des axes de contraintes (transition compression-décrochement), ainsi qu'une rotation de ces mêmes axes (transition décrochement-extension). Les déformations compressives locales sont quant à elles associées aux irrégularités géométriques en profondeur des failles.

**Mots-Clés:** Pyrenees, Gulf of Lion rifting, Priabonian, basin analysis, seismic reflexion

<sup>\*</sup>Intervenant

## Meso-cenozoic structural and thermal evolution of the Axial Zone, Pyrenees

Maxime Waldner <sup>\*1</sup>, Nicolas Bellahsen <sup>2</sup>, Frédéric Mouthereau <sup>3</sup>, Raphaël Pik <sup>4</sup>, Matthias Bernet <sup>5</sup>,  
Claudio Rosenberg <sup>1</sup>

<sup>1</sup> ISTeP – Université Pierre et Marie Curie [UPMC] - Paris VI - France

<sup>2</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP) – Université Pierre et Marie Curie (UPMC) - Paris VI, CNRS : UMR7193, Université Pierre et Marie Curie [UPMC] - Paris VI - 4, place Jussieu BP CC129 75252 PARIS CEDEX 05, France

<sup>3</sup> GET - Observatoire Midi-Pyrénées UMR 5563 – Université Paul Sabatier-Toulouse III - UPS - Observatoire Midi-Pyrénées 14 Avenue Edouard Belin 31400 Toulouse, France

<sup>4</sup> Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG) – Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7358 - CNRS / Université de Lorraine, 15 rue Notre-Dame des Pauvres, 54500 Vandoeuvre-les-Nancy, France

<sup>5</sup> UJF - Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) – Université Joseph Fourier - Grenoble I - Grenoble, France

Pyrenean orogeny was formed by collision between European and Iberian plates. In the Axial Zone, published data suggest that the exhumation started during the lower Eocene with a propagation of the onset of exhumation from north to south and east to west, and a peak at about 30-35 Ma. These data capture the main pattern of exhumation but cannot be used to discuss the early spatio-temporal evolution of the orogenic wedge in details. Moreover, the pre-orogenic thermal evolution of the Axial Zone is rarely discussed. Is there a thermal influence of the Mesozoic rift in the Axial Zone? Is there an early phase of distributed shortening before the initiation of the major thrusts? When did the exhumation start? And how did it propagate? We performed zircon and apatite fission tracks and (U-Th)/He on zircons analyses to provide a complete dataset to discuss the thermos-structural evolution of the Pyrenean collisional wedge. In particular, we provide triple datings on zircons (U/Pb, ZFT, U-Th/He) from plutonic massifs along the ECORS-Toulouse profile. Our dataset suggests a significant exhumation during mid-Cretaceous times in the northern axial zone (and possibly in the whole axial zone) most likely associated to the rifting in the North Pyrenean Zone. The dataset also suggests a higher-than-normal geotherm in the northern axial zone (possibly up to 40-50°C/km) until Paleogene times.

We also show that the orogenic exhumation started during upper Paleocene times and were quite fast during the lower Eocene. Those data tend to show that the cooling history is much more complex than previously thought. Thermal inverse modelling with QTQt provide the most accurate thermal history of the central axial zone and constrain the structural evolution of the Pyrenean wedge as well as its rheology.

This study is part of the Orogen research project, a tripartite partnership between academy and industry (Total, BRGM, CNRS).

**Mots-Clés:** Exhumation sequence, Pyrenees, Thermochronology, Fission Tracks, (U, Th)/He, Zircon

<sup>\*</sup>Intervenant

## 2.4. Du rifting à l'océanisation - Observations et modélisations

## Lithospheric breakup: observations from magma-poor settings

Julia Autin <sup>\*1</sup>, Paul Bernard <sup>2</sup>, Morgane Gillard <sup>2</sup>, Gianreto Manatschal <sup>3</sup>, Daniel Sauter <sup>4</sup>,  
Marc Schaming <sup>1,5</sup>

<sup>1</sup> Institut de physique du globe de Strasbourg (IPGS) – université de Strasbourg, INSU, CNRS : UMR7516 – 5 Rue René Descartes 67084 STRASBOURG CEDEX, France

<sup>2</sup> Institut de physique du globe de Strasbourg (IPGS) – université de Strasbourg- France

<sup>3</sup> Université de Strasbourg - Institut de Physique du Globe de Strasbourg, UMR7516 CNRS / Université de Strasbourg / EOST – France

<sup>4</sup> Ecole et Observatoire des sciences de la terre de Strasbourg-IPGS (EOST) – CNRS : UMR7516 – 5 Rue René Descartes 67084 STRASBOURG CEDEX, France

<sup>5</sup> Labex G-Eau-Thermie Profonde – université de Strasbourg – France

As we multiply observations from magma-poor lithospheric breakups (i.e. the very last stage where mantle is exhumed and is finally replaced by oceanic crust), we are able to identify more and more similarities and differences, which could be characteristic from the initial rheology or from the inheritance of the broken lithosphere. Here we explore several study areas allowing to cover very different settings where mantle is exhumed: (1) The Australo-Antarctic Basin where breakup occurred in continental lithosphere in the East and in old oceanic lithosphere in the West, (2) the South-West Indian Ridge where very young oceanic lithospheric mantle is exhumed, (3) the young Gulf of Aden margins where the magma-poor or -rich nature varies laterally. We used seismic reflection data and potential field data in order to identify the key boundaries allowing to identify the lithospheric breakup. Different styles of deformation are observed, not all are understood. The on-going projects include the better understanding of the non-oceanic magnetic anomalies (not linked to magma-rich oceanic crust), the 3D modelling of the thermal state of the most distal margins, and acquisition of new data in the Bay of Biscay.

**Mots-Clés:** Rifted margins, lithospheric breakup, exhumed mantle

Intervenant

## Northern Red Sea: unravelling the tectono-thermal evolution of a hyper-extended rift system

Philip J. Ball <sup>\*1</sup>, Daniel F. Stockli<sup>2</sup>, Samuel Robbins , Julie Tugend <sup>3,4</sup>, Emmanuel Masini <sup>\*5</sup>

<sup>1</sup> Total EP – États-Unis

<sup>2</sup> Jackson School of Geosciences – États-Unis

<sup>3</sup> Total SA, CSTJF, Avenue Larribau, 64000 Pau, France – TOTAL, CSTJF, Pau – France

<sup>4</sup> Sorbonne Université, CNRS-INSU, ISTEPI UMR 7193, F-75005 Paris, France - France

<sup>5</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – France

The tectono-thermal evolution of rifted margins is currently challenged by observations derived from fossil hyperextended rift domains and from present-day settings showing previously unpredicted HT events. Linking the thermal and tectonic evolution of a rifted margin is assumed to be a numerical modelling challenge but requires additional geological constraints. As the Northern Red Sea is a young rift, it represents an ideal candidate to investigate this issue. The scarcity of seismic data and the presence of salt triggers debates on its maturity and overall tectonic evolution. In this work, we combine previously published and new field, subsurface and thermochronological data sets to highlight key tectono-thermal events during the NRS evolution.

Onset of diffuse rifting occurred ~23 Myrs ago associated with syn-rift magmatic intrusions which are, present day, dominantly located within the Arabian plate and may have resulted in an early-rift anomalous thermal event. Between ca. 20-15 Ma, thinning rapidly occurred forming crustal necks along the conjugate margins. Necking is accompanied by a major rift shoulder uplift, evidenced from structural and thermochronological data. By 14-15 Ma the Red Sea and the Gulf of Suez rift were deforming concurrently, the crustal necking and thinning phase seems to have led to hyperextension and lower crust exhumation. Evidence for exhumation is suggested by subsurface data, metamorphic assemblages and geochronology from the Zabargad and Brother islands which exposes lower crust and mantle rocks assemblages. The occurrence of salt-bearing fluid inclusions in the mantle rocks exposed in Zabargad island, draped by Middle Miocene evaporites (16-11 Ma) suggest that halite deposition is contemporaneous with mantle exhumation and may be genetically linked. Additional fluids data coming from previous studies suggest a thermal gradient exceeding 100°C/km at this stage. However, further data is required to test the regional meaning of these value (conductive/convective thermal regimes). At ~14 Ma the transition from crustal thinning to mantle exhumation coincides with the onset of oblique rifting within the Red Sea. In the north, the Gulf of Suez tectonically aborts and transtensional deformation initiated, overprinting early rift structures as the plate boundary localized towards the present-day Aqaba axis, forming a continental transform fault-boundary to the NE. This could suggest that mechanical coupling of the rifted lithosphere and the change in plate kinematics are linked.

Around 6-8 Ma, a post-exhumation thermal overprint is recorded in Zabargad island, which is associated with intense hydrothermal activity resulting in the breakdown of rutile to ilmenite (U- Pb and (U-Th)/He datings). We ascribe this record as the northward propagation of lithospheric break-up from south to NRS.

**Mots-Clés:** Red Sea, Zabargad, rifting, break, up, thermicity, tectonic, plate kinematics

## Méthodes potentielles appliquées à la quantification de l'aimantation au sein des premières croûtes océaniques

Paul Bernard \*<sup>1</sup>, Julia Autin <sup>1</sup>, Pauline Le Maire <sup>1</sup>, Munsch Marc <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut de physique du globe de Strasbourg (IPGS) – université de Strasbourg, INSU, CNRS : UMR7516 – 5 Rue René Descartes 67084 STRASBOURG CEDEX, France

La méthode actuelle pour définir l'âge de la croûte océanique à partir des anomalies magnétiques est qualitative. Cette thèse a pour but d'utiliser des méthodes quantitatives pour l'interprétation des anomalies magnétiques en mer. Il s'agit en particulier de définir objectivement la position des inversions du champ magnétique terrestre (donc leur âge). Cela est particulièrement intéressant pour la compréhension des marges riftées peu magmatiques où la datation des anomalies est souvent controversée (application aux marges Australo-Antarctique et Ibérie-Terre Neuve). En effet, de nombreuses anomalies sont susceptibles d'être liées à d'autres phénomènes que l'inversion du champ magnétique. Notamment, la rupture de la lithosphère s'accompagne d'événements magmatiques provoquant des linéations magnétiques qui ne sont pas forcément dues à des inversions du champ. Les premiers résultats de la thèse portent sur les marges conjuguées Australie-Antarctique, pauvres en magma. La première étape a été l'application de nouveaux traitements de données au signal d'anomalie magnétique régional. Les dérivées horizontales et verticales du signal, après réduction aux pôles et prolongement vers le haut, ainsi appliquées permettent l'observation de nouvelles linéations magnétiques d'échelle plurikilométrique, en particulier au niveau de la marge Antarctique. Une analyse conjointe de ce signal magnétique régional traité avec le signal gravimétrique et les profils sismiques des campagnes AG199, 228 et 229 pour les marges conjuguées Australie-Antarctique a également été réalisée. Elle permet une corrélation entre une anomalie magnétique, une anomalie gravimétrique et la limite entre le domaine de croûte continentale et celui d'exhumation du manteau. Des anomalies pourraient aussi être corrélées à des zones d'intrusions magmatiques au sein du domaine de manteau exhumé.

**Mots-Clés:** marges pauvres en magma, rifting, océanisation, exhumation mantellique, anomalies magnétiques

\*Intervenant

## Rift basins and structural inheritance on the western termination of the North Anatolian Fault, Aegean Sea (Greece); First results from WATER cruise (R/V Tethys II, July 2017)

Frank Chanier <sup>\*1</sup>, Virginie Gaullier <sup>1</sup>, Julien Bailleul <sup>2</sup>, Martin Jollivet-Castelot <sup>1</sup>, Agnès Maillard <sup>3</sup>, Fabien Paquet <sup>4</sup>, Dimitri Sakellariou <sup>5</sup>, Antoine Bonnière <sup>1</sup>, Lucile Cayla <sup>1</sup>, Louise Watremez <sup>1</sup>, Fabien Graveleau <sup>1</sup>, Olivier Averbuch <sup>1</sup>, Bruno Vendeville <sup>1</sup>, Jacky Ferrière <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – Université de Lille, Université Littoral Côte d'Opale, CNRS : UMR8187 – France

<sup>2</sup> Bassins Réservoirs Ressources (B2R) – Institut UniLaSalle Beauvais – France

<sup>3</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – Institut de Recherche pour le Développement, Université Paul Sabatier - Toulouse 3, Observatoire Midi-Pyrénées, CNRS : UMR5563 – France

<sup>4</sup> DGR-GBS – Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

<sup>5</sup> Hellenic Centre for Marine Research (HCMR) – 47th km Athens-Sounio Ave 19013 Anavyssos, Grèce

The WATER project (Western Aegean Tectonic Evolution and Reactivations) focuses on the study of a tectonically active domain of the northwestern Aegean Sea (Greece): the Oreoi Channel and the North Evia Gulf.

This Oreoi Channel - North Evia Gulf domain, including the onshore Sperchios basin, is a key area located at the junction between the extensional basins associated with the southward escape of the Aegean crust (e.g., the Corinth and Sperchios rifts), the frontal thrusts of the internal Hellenic zones, and the western termination of the active North-Anatolian Fault. We acquired new high-resolution seismic data (Sparker) in order 1) to find the location of recent and active faults associated with crustal deformation, and 2) to understand the role of former structures (*i.e.* the Paleogene Hellenic Frontal Thrust) on the distribution of recent deformation and associated extensional basins.

The WATER cruise (July 24th to August 04th 2017) onboard the R/V "Tethys II" was dedicated to the acquisition of high-resolution seismic data aimed at identifying and characterizing recent and active deformation and establishing a precise structural framework on the basis of detailed fault mapping. Particularly, our goal was to determine precisely the relative timing of deformation episodes and to correlate these new data from an onshore structural analysis in order to discuss the role of structural inheritance on recent deformation and, more generally, on rift basin development. Here, we present the preliminary results of the interpretation of seismic lines that show various structural domains within the Evia Gulf rift basin, having different relative age of brittle deformation and different distribution, orientations and amplitude of faulting. We compare these first results from new marine data with field-based fault analysis from the Sperchios Basin, which is the western onshore prolongation of the Gulf of Evia.

**Mots-Clés:** Rift Basin, Active faults, Tectonic inheritance, Hellenides, North Anatolian Fault, Evia Gulf, Aegean Sea, Greece

\*Intervenant

## Post-rift evolution of magma-rich passive margins

François Chauvet <sup>\*1</sup>, Laurent Geoffroy <sup>2</sup>, Jean-Loup Rubino <sup>3</sup>, Massimo Dall'asta <sup>4</sup>, Marc Lescanne <sup>5</sup>,  
 Philippe Werner <sup>6</sup>, Jean-Noël Ferry <sup>7</sup>, Frank Despinois <sup>8</sup>

<sup>1</sup> Sédisor – UMR 6538 LGO, IUEM-UBO – France

<sup>2</sup> IUEM, UMR 6538 – Université de Bretagne Occidentale [UBO] – PLOUZANE, France

<sup>3</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – France

<sup>4</sup> Total Exploration-Recherche (Total EP) – Total EP – Pau, France

<sup>5</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – France

<sup>6</sup> Total – Total Exploration – 2 Place Jean Millier -92078 PARIS La Défense,, France

<sup>7</sup> Total EP Research Development – TOTAL – CSTJF, Avenue Larribau, 64000 Pau, France

<sup>8</sup> Total EP – TOTAL, CSTJF, Pau – France

Volcanic passive margins (VPMs) are associated with voluminous addition of magma during extension and thinning of the continental lithosphere. This magmatism modifies the volume and the chemical, thermal and physical properties of in-extension continental lithosphere. A correlated issue is the evaluation of the consequence of this magmatism on VPM post-breakup thermal subsidence.

We used an extensive seismic reflexion dataset to analysis post-rift stratigraphy of the Southern Atlantic VPMs regarding their deep structure. We tried to unravel the contribution of syn-rift magmatic budget and climato-eustatic variations on the architecture of post-rift sedimentary wedges. We analyze in both dip and strike, the time evolution of the paleo-bathymetry of the Uruguay and SE Brazil margin segments, as a function of the various thinning profile of the crust determined taking into account the estimated volume of added magma.

We notably highlight that:

Variations in total thickness of the post-rift succession are intimately correlated to the thickness of continental crust and to the thickness of the seaward-dipping reflectors (SDRs) wedges. This is true both along and across VPMs, demonstrating a long-term control of the deep structure on the flexural evolution of those margins;

Margin segments superposed to ancient and pre-magmatic rifted basins such as the offshore Punta Del Este basin (Uruguay) are comparatively devoid of syn-rift volcanic activity and present the highest post-rift subsidence rate;

The first post-rift sequences of the distal parts of the margin exhibit very clear sedimentary progradation associated with shallow sedimentary features recognized on amplitude maps of a 3D seismic survey (e.g. estuarine and deltaic-type meandering complex, erosional sequence boundary, etc.). We argue for a 10 to 20 Myrs delay for the subsidence of the distal parts of the margin. This likely highlights a possible dynamic and/or thermal mantle control or/and on-going lower-crust exhumation on the buoyancy and consecutive basin geometry during the immediate post rift period.

New advances in 2-D forward thermo-mechanical modelling allow now simulating volcanic margins with the production of intrusive & extrusive SDR magma flows. The first results of such thermo-mechanical models (Gang et al., 2018) have tested two main parameters: the crustal strength & the mantle temperature and they suggest drastic differences in the geometry of VPMs. In the future the impact of these various geometries on the paleo-bathymetry & on the post-rift evolution will have to be investigated.

**Mots-Clés:** Volcanic Passive Margin, Seaward Dipping Reflectors, Postrift evolution, Uruguay, Pelotas\*

## Multiple decollement levels in the extended crust of Dangerous Ground, South China Sea

Matthias Delescluse <sup>\*1</sup>, Yao Liang <sup>2</sup>, Manuel Pubellier <sup>1</sup>, Nicolas Chamot-Rooke <sup>1</sup>, Sung-Ping Chang <sup>1</sup>, Louise Watremez <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de géologie de l'ENS Paris, PSL Research University, Paris, France - CNRS : UMR8538, École normale supérieure [ENS] - Paris - France

<sup>2</sup> Key Lab of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China - Chine

<sup>3</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - CNRS : UMR8187, Université des Sciences et Technologies de Lille - Université du Littoral Côte d'Opale - France

Interpretation of the first complete refraction seismic line across the South China Sea (SCS) reveals that the continental crust had been stretched and thinned up to 12km over a very large area. In both East and SW basins of the SCS, the continent-ocean transition zone is narrow as a result of fast break-up propagation, which however stalled from ~32 Ma (East) to ~25 Ma (SW). This stalled oceanic propagation has recently been shown to be the result of out of plane compression, as propagation reached the vicinity of the Indochina Craton topographic barrier. Here, we investigate the crustal structure in an area located in Dangerous Ground, south of the oceanic basins, at the boundary between the East and SW basins. Sediments there do not record very well the significant extension processes. Through processing and interpretation of both multichannel and refraction seismic data, we image the shallow and deep structures allowing thinning of the crust to a ~15 km thickness.

We first identify two décollement levels in the crust. The shallow décollement lies below exhumed metamorphic units (dredged Cretaceous paragneiss, ~5-5.5 km/s) and above the 6.2 km/s velocity isocontour of the refraction model. The upper crust itself also shows clear, sometimes tilted sedimentary layering below the main acoustic basement. Below these upper crustal reflectors, a mid-crustal interface is visible, at the boundary between upper and lower crust in the refraction velocity model.

From the complex sedimentary record and the deep crustal structure, we identify two main structural styles of extension linked to the two decollement levels. 1- Faults rooting on the shallow decollement. In a first phase, steep faults formed narrow basins filled with Palaeogene sediments separated by basement highs. Most of these faults have been obliterated by a second phase of rotation of the blocks on much more developed listric faults. 2 - Localized detachment faulting through the entire crust or rooting in the lower crust. An associated Moho uplift is visible on both refraction and reflection data, as well as boudinage of the lower crust and a decollement at the top of the lower crust. The major detachment fault destabilizes Paleogene sediments deposited in basins described in 1. The resulting mass transport deposits (MTDs) are the only expression of this large offset fault in the sedimentary record, as post-rift sediments immediately cover the MTDs. Our results emphasize the large variations of extensional styles laterally and in function of depth as a result of the composite nature of the crust.

**Mots-Clés:** South China Sea, Detachment, Décollement, Extension, Seismics

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: delescluse@geologie.ens.fr

## Interaction of tectonic and magmatic processes related to exhumation of the mantle in Ocean Continent Transitions

Marie-Eva Epin <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Gianreto Manatschal <sup>1</sup>, Méderic Amann <sup>1</sup>, Charlotte Ribes <sup>1</sup>, Antoine Clausse <sup>1</sup>, Théobald Guffon <sup>1</sup>, Frank Despinois <sup>2</sup>, Jean-Noël Ferry <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de Strasbourg – Institut de Physique du Globe de Strasbourg, UMR7516 CNRS / Université de Strasbourg / EOST – France

<sup>2</sup> Total (EP/SCR/RD/PROG-FTE) – TOTAL, CSTJF, Pau – France

Despite the fact that many studies have investigated mantle exhumation at ultraslow spreading ridges and magma-poor rifted margins, there are still numerous questions that remain unexplained concerning the 3D architecture, magmatic, fluid and thermal evolution of these domains. Indeed, it has been observed in seismic data from ultra-distal magma-poor rifted margins that top basement is heavily structured and complex, however, the associated morpho-tectonic and magmatic processes remain unknown. The aim of this presentation is to describe, using the example of the Platta nappe in SE Switzerland, the 3D architecture of the exhumed mantle domain as well as its evolution and discuss the processes controlling its formation. A particular focus will be on the link between rift/oceanic structures, magmatic additions and hydrothermal fluid systems. Our observations show a polyphase evolution with a: 1) deformation history associated with mantle exhumation along low-angle exhumation faults overprinted by later high-angle normal faults, 2) top basement morphology capped by magmato-sedimentary rocks, 3) exhumation of gabbros emplaced at deeper levels and overlain by younger extrusive magmatic additions, and 4) fluid systems related to serpentinization, calcification, hydrothermal vents, rodingitization and spilitization affecting exhumed mantle and associated magmatic rocks. The overall observations provide important information on the temporal and spatial evolution of the tectonic, magmatic and fluid systems controlling the formation of ultra-distal magma-poor rifted margins. Fields observations describing this transitional domain enable to better constrain and define the characteristic of this domain on seismic lines, and to better constrain the processes controlling lithospheric breakup.

**Mots-Clés:** Ocean continent transition, tectonic and magmatic interactions, oceanisation

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>✉</sup>Auteur correspondant: [meepin@unistra.fr](mailto:meepin@unistra.fr)

## Transition from extensional unroofing of an orogen to crustal thinning, Corinth rift area, Greece.

Mary Ford <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Kevin Beaufumé <sup>1</sup>, Jean-Claude Ringenbach <sup>2</sup>, Emmanuel Masini <sup>\*<sup>2</sup></sup>,  
Haralambos Kranis <sup>3</sup>, Emmanuel Skourtos <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Lorraine, ENSG – Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, UMR 7358 CNRS-UL – France

<sup>2</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – France

<sup>3</sup> National and Kapodistrian University of Athens – Grèce

The Corinth rift, western Greece, developed from 5-4 Ma to present day and currently represents one of the fastest opening rifts in the world. It is the youngest expression of major lithospheric extension in the Aegean realm that began at 30 Ma and which is generally attributed to backarc extension above the SW retreating Hellenic slab associated with the westward propagation of the North Anatolian Fault from 5 Ma. The E-W Corinth rift records northward and westward migrating and accelerating fault activity. Its major faults cut at a high angle across older structures of the Peloponnese peninsula recording, firstly, W-SW emplacement of the Hellenide thrust sheets starting in the Oligocene and secondly, exhumation of high pressure rocks, which are exposed immediately south of the rift in the Feneos window. Metamorphism of this HP-LT Phyllite-Quartzite unit in the Peloponnese is dated at 25-18 Ma and records pressures equivalent to 40 km depth (Trotet et al. 2006). Exhumation of the HP units at the southern tip of the Peloponnese peninsula has been dated by Apatite fission tracks at 7-10 Ma (Marcel-los 2010). In the Feneos area extensional unroofing of the HP unit is superimposed by high angle normal faulting of the Corinth rifting. The dynamic relationship between these two extensional regimes has long been debated. In this presentation we present a field investigation of the chronology, geometry and kinematics of extensional thinning of the Hellenide nappe stack in and around the Feneos tectonic window. We describe the transition from this regime to crustal scale extension that created the younger Corinth rift and discuss regional implications and controlling parameters.

**Mots-Clés:** extensional unroofing, rifting, Corinth rift

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>\*\*</sup>Auteur correspondant: mary.ford@univ-lorraine.fr

## The Eastern Sardinian Margin: From rifting to hyper-extension in a backarc setting

Virginie Gaullier <sup>\*ψ1</sup>, Frank Chanier <sup>1</sup>, Gaël Lymer <sup>2</sup>, Agnès Maillard <sup>3</sup>, Isabelle Thinon <sup>4</sup>,  
Johanna Lofi <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, F59000 Lille, France – Université Lille I - Sciences et technologies – France

<sup>2</sup> School of Geography, Earth and Environmental Sciences, University of Birmingham – Royaume-Uni

<sup>3</sup> Géosciences Environnement Toulouse - UMR 5563 – Observatoire Midi-Pyrénées, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UMR239, Université Paul Sabatier (UPS) - Toulouse III, CNRS : UMR5563 - 14 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

<sup>4</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) – 3, av. Claude Guillemin 45060 Orléans Cedex, France

<sup>5</sup> Géosciences Montpellier (GM) – CNRS : UMR5243, Université Montpellier II - Sciences et techniques – Place E. Bataillon - CC 60 34095 MONTPELLIER CEDEX 5, France

The Eastern Sardinian margin developed during the opening of the Tyrrhenian Sea, a neogene backarc basin created by continental rifting and oceanic spreading related to the eastward retreat of the Apennine subduction system. We present the structural characteristics of a complete section of this continent-ocean transition, from the upper margin onland toward the deep oceanic basin. The proximal margin includes the onshore domain (Eastern Central Sardinia) and the offshore East Sardinia Basin that is bordered on its eastern side by a step that has to be considered as the main necking zone. The distal margin is a hyper-extended domain corresponding more or less to the Cornaglia Terrace that is separated with the domain of exhumed mantle and oceanic crust by a clear morphological step with some large faults and tilted blocks. Rifting in the hyper-extended domain was considered to be pro parte coeval with the Messinian Salinity Crisis (MSC, 5.96-5.32 Ma). We use the MSC seismic markers and the deformation of viscous salt and its brittle overburden as proxies to better delineate the timing of rifting. On this young, highly-segmented margin, the Messinian Erosion Surface and the Upper and Mobile Units are systematically associated, respectively, to basement highs and deeper basins, showing that a rifted deep-sea domain already existed by Messinian times, therefore a major pre-MSC rifting episode occurred across the entire domain. Data also show that there are no signs of Messinian syn-rift sediments, hence no evidence for rifting after Late Tortonian times. Moreover, because salt tectonics creates fan-shaped geometries in sediments, syn-rift deposits have to be carefully re-examined to distinguish the effects of crustal tectonics and salt tectonics. We also show that rifting is diachronous from the upper margin (East-Sardinia Basin) to the lower margin (Cornaglia Terrace) with two unconformities, attributed respectively to the necking and to the lithospheric breakup unconformities. The onshore part of the upper margin has been also investigated in order to characterize the large crustal faults affecting the Mesozoic series and to decipher the role of the structural inheritance on the early rifting deformation. Seaward, we also constrain the structural style and timing of the main boundaries such as the necking domain and the continent-ocean transition, between the hyper-extended continental crust and the early oceanic crust or exhumed mantle.

**Mots-Clés:** Tyrrhenian Sea, Eastern Sardinian Margin, rifting, hyper, extended margin

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: virginie.gaullier@univ-lille1.fr

## Influence de l'héritage des structures compressives sur l'extension active en Grèce continentale : résultats de modélisation expérimentale

Fabien Graveleau <sup>\*1</sup>, Frank Chanier <sup>1</sup>, Clément Boivin <sup>1</sup>, Antoine Bonnière <sup>1</sup>, Bruno. C. Vendeville <sup>1</sup>, Olivier Averbuch <sup>1</sup>, Virginie Gaullier <sup>1</sup>, Jacky Ferrière <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - Université de Lille, CNRS : UMR8187, Université du Littoral Côte d'Opale - France

Les mécanismes de l'inversion tectonique négative, c'est à dire la reprise en extension de structures compressives héritées, sont peu étudiés par rapport à ceux de l'inversion tectonique positive qui correspond à la reprise en compression d'anciennes structures extensives. Il s'agit cependant d'un processus géologique courant durant les dernières phases d'évolution d'un orogène (extension tardive/post-orogénique) et qui s'observe dans un grand nombre de contextes géodynamiques actifs (Grèce, Taiwan, Cordillère Nord-Américaine) et fossiles (chaîne varisque).

Dans ce travail, nous avons analysé les mécanismes d'inversion tectonique négative et notamment l'influence de l'obliquité originelle de structures compressives sur la géométrie et la cinématique des structures extensives ultérieures. Pour cela, nous avons développé une approche de modélisation analogique et confronté nos résultats expérimentaux aux données de terrain (analyse cinématique des failles) relevées dans la région du Sperchios en Grèce continentale. Cette zone a subi une évolution orogénique polyphasée au cours du Paléogène puis une inversion tectonique négative au Plio-Quaternaire associée à l'extension post-orogénique et/ou à l'extension de la plaque égée en réponse au retrait du panneau plongeant africain. Dans le secteur de notre étude, le grand système extensif Plio-Quaternaire du Sperchios se superpose obliquement au grand chevauchement des zones internes sur les zones externes.

Nos modèles analogiques ont permis de tester des angles d'obliquité de 20 à 45 entre les structures compressives initiales (Zone de Faiblesse - ZF) et la direction d'extension. Nous utilisons du sable sec pour représenter la croûte supérieure cassante et un polymère de silicium pour la croûte inférieure ductile et la ZF. Nous montrons que : 1) la ZF est systématiquement réactivée quelle que soit l'obliquité et 2) la valeur de l'obliquité influence significativement la géométrie et la distribution des structures extensives néoformées et leur interaction avec la ZF. Ainsi, pour des valeurs d'obliquité croissantes, nous constatons une virgation des grabens qui viennent se paralléliser à la ZF puis progressivement un recoupement de la ZF par les grabens.

Ceci suggère dans le cas du bassin du Sperchios, que les interactions entre les failles normales et le front des zones internes ont pu changer au cours du temps avec les variations de la direction d'extension (NE-SW au Pliocène et N-S au Quaternaire récent).

**Mots-Clés:** Inversion tectonique négative, graben, héritage structural, Grèce, Hellénides, Bassin du Sperchios

<sup>\*</sup>Intervenant

## Le Système du Rift est-africain: calendrier de la déformation et de la croissance des reliefs – évolution cénozoïque du routage sédimentaire

François Guillocheau <sup>\*1</sup>, Cécile Robin <sup>1</sup>, Brendan Simon <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Rennes (UMR6118) – Université de Rennes 1, CNRS : UMR6118 – Bâtiment 15 - Campus de Beaulieu - CS 74205 - 35042 Rennes Cedex - France, France

Le Système du Rift est-africain (SREA), long de 4500 km, s'étend de l'Ethiopie au nord à la plaine du Limpopo (Sud-Mozambique) et à Madagascar (rift de l'Alaotra) au sud. La topographie du SREA se décompose en plusieurs longueurs d'onde (1) très grande longueur d'onde ( $l = x1000\text{km}$ ) correspondant aux très grands dômes (Ethiopien, Est-Africain...), (2) moyenne à grande longueur d'onde ( $l = x10 \text{ km to } 100 \text{ km}$ ) correspondant au rift s.s. et (3) moyenne à courte longueur d'onde ( $l = x10 \text{ km to } x1 \text{ km}$ ) correspondant aux épaulements de rift.

Nous présentons ici les résultats d'une étude géomorphologique à terre couplée à l'analyse stratigraphique du remplissage des rifts afin de proposer un nouveau scenario de surrection et de croissance des différents reliefs et leurs implications sur l'évolution du drainage des rivières.

(1) L'initiation de la surrection des dômes, de l'extension des rifts et de la croissance des épaulements de rift est diachrone, les plus vieux étant les dômes et les plus jeunes les épaulements de rift.

(2) La surrection des dômes (éthiopien et est-africain) commence à l'Eocène supérieur, surimposé dans le cas du dôme est-éthiopien sur un plateau résiduel d'âge crétacé supérieur. Cette surrection s'intègre dans une déformation d'échelle africaine d'origine mantellique. La vitesse de surrection est d'abord faible, puis augmente en deux temps, durant la fin du Miocène inférieur et à la base du Miocène supérieur.

(3) L'organisation actuelle du rift débute à la fin du Miocène inférieur le long de la branche ouest du REA (rift du Lac Albert) et plus tardivement sur sa branche est (rift centre kenyan). Il se propage ensuite vers le nord sur le dôme éthiopien (rift principal éthiopien – Miocène supérieur) et vers le sud, sur la divergence nord-tanzanienne (Miocène terminal - base Pliocène).

(4) La surrection des épaulements de rift du rift centre kenyan se produit durant le Pliocène, soit 10 Ma après le début de l'extension du rift, et celle du rift du Lac Albert (montagnes de la Ruwenzori) aux alentours de 5-3 Ma, soit 15 Ma après le début de l'extension du rift.

(5) Le système de routage des sédiments. La Rovuma, la Ruvu et la Tana sont actives depuis la base du Cénozoïque en réponse à un rebond isostatique marqué de la plaine côtière située à l'est de la branche est du REA. Le Miocène marque une augmentation des flux sédimentaires de la Rovuma et de la Ruvu, l'initiation de la Rufiji et l'arrêt de la Tana.

**Mots-Clés:** Rift, Afrique, Géomorphologie, Bassin, Cénozoïque

\*Intervenant

## Coupling of crustal extension with mantle flow

Laurent Jolivet <sup>\*1</sup>, Armel Menant <sup>2</sup>, Camille Clerc <sup>3</sup>, Pietro Sternai <sup>4</sup>, Nicolas Bellahsen <sup>5</sup>, Sylvie Leroy <sup>6</sup>, Raphaël Pik <sup>7</sup>, Martin Stab <sup>6</sup>, Claudio Faccenna <sup>7</sup>, Christian Gorini <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne Université – Sorbonne Universités, UPMC, CNRS – France

<sup>2</sup> Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) – CNRS : UMR7154, INSU, IPGP – France

<sup>3</sup> Université de la Nouvelle Calédonie – France

<sup>4</sup> Université de Genève – Suisse

<sup>5</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTEPI – Université Pierre et Marie Curie (UPMC) - Paris VI, CNRS : France

<sup>6</sup> Université de Lorraine – CNRS : UMR7358 – France

<sup>7</sup> Universita Rome Tre – Italie

We present a number of geological observations in extensional contexts, either continental rifts or back-arcs, that show different situations of potential coupling between asthenospheric flow and crustal deformation. Several of these examples show a deformation distributed over hectometric to kilometric shear zones, accommodated by shallow dipping shear zones with a constant asymmetry over large distances. This is the case of the Mediterranean back-arc basins, such as the Aegean Sea, the northern Tyrrhenian Sea, the Alboran domain or the Gulf of Lion passive margin. Similar types of observation can be made on some of the South Atlantic volcanic passive margins and the Afar region, which were formed above a mantle plume. In all these examples the lithosphere is hot and the lithospheric mantle thin or possibly absent. We discuss these contexts and the main controlling parameters for this asymmetrical distributed deformation that implies a simple shear component at the scale of the lithosphere. These parameters include an original heterogeneity of the crust and lithosphere (tectonic heritage), lateral density gradients and a possible contribution of the underlying asthenospheric flow through basal drag or basal push. We discuss the relations between the observed asymmetry and the direction and sense of the mantle flow underneath. The chosen examples suggest that two main mechanisms can explain the observed asymmetry: (1) shearing parallel to the Moho in the necking zone during rifting and (2) viscous coupling of asthenospheric flow and crustal deformation in back-arc basins and above plumes. Slipping along pre-existing heterogeneities seems a second-order phenomenon at lithospheric or crustal scale.

**Mots-Clés:** passive margin, extension, rifting, plume, mantle flow, hot margins

## Les évaporites, un élément clé de la déformation des bassins sédimentaires : le cas du segment Central de l'Atlantique Sud. Premiers résultats

Sophie Laspatzis <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Delphine Rouby <sup>2</sup>, Sébastien Rohais <sup>1</sup>

<sup>1</sup> IFP Energies nouvelles (IFPEN) – 1et 4 Avenue de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison Cedex, France – France

<sup>2</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – Observatoire Midi-Pyrénées, Université Paul Sabatier [UPS] - Toulouse III, CNRS: UMR5563, 14 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

Notre étude s'intéresse aux liens entre les géants salifères et les processus de déformation lithosphérique. Nous présentons ici les premiers résultats sur le cas du segment Central de l'Atlantique Sud qui est le seul segment de l'Atlantique Sud à avoir enregistré la mise en place d'évaporites. Il s'agit de comprendre quelles sont les conditions géodynamiques externes et internes de ces marges favorisant des dépôts salifères importants, au-delà de la problématique du climat. Nous avons réalisé une analyse de l'évolution des milieux de dépôt de chaque bassin des marges conjuguées du segment Central. Cette évolution est présentée de manière normative en fonction des différentes phases du rift (pré-rift, syn-rift, transition, post-rift), afin de faciliter la comparaison entre bassins. Les tendances communes des bassins étudiés sont ci-après détaillées. Pendant le rifting, les bassins enregistrent une sédimentation continentale fluvio-lacustre. Quelques dépôts marins côtiers sont documentés dans le secteur sud et dans la partie sommitale du syn-rift. La phase de transition (" sag ") est associée à un passage d'une sédimentation continentale/proximale à une sédimentation marine précédant les dépôts marins profonds post-rift. Les évaporites se mettent systématiquement en place à la fin de cette transition tectonique et sédimentaire, et leur dépôt représente en moyenne 50% de la durée de la phase de transition. Les courbes de subsidence de certains bassins montrent également que les évaporites se déposent lors de changements (accélération ou décélération) dans les vitesses de subsidence.

La phase de transition (" sag ") peut donc se subdiviser en deux phases : une première qui enregistre localement des bathymétries de plus de 500m et une connexion progressive des grands dépocentres ; et une seconde durant laquelle les grands dépocentres sont encore individualisés et la sédimentation est principalement évaporitique. Cela implique des bathymétries assez faibles au moment de la rupture continentale or les modèles thermodynamiques prédisent tous actuellement des bathymétries plus profondes à ce stade. La compréhension des facteurs de contrôle sur la sédimentation salifère le long des marges de l'Atlantique Sud peut donc apporter des contraintes de premier ordre pour les modèles géodynamiques. Ces résultats seront finalement mis en perspective face à d'autres géants salifères.

**Mots-Clés:** Evaporite, bathymétrie, subsidence, Atlantique Sud, marge passive, modélisation

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>✉</sup>Auteur correspondant: sophie.laspatzis@outlook.com

## Early syn-rift segmentation control on the Cenozoic tectono-magmatic evolution of the Afar-Red Sea-Gulf of Aden system

Sylvie Leroy <sup>\*1</sup>, Martin Stab <sup>1</sup>, Nicolas Bellahsen <sup>1</sup>, Raphaël Pik <sup>2</sup>, Dereje Ayalew <sup>3</sup>, Khaled Khanbari <sup>4</sup>,  
Marc Lescanne <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTEPI) – Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7193,  
Sorbonne Université UPMC Paris VI – France

<sup>2</sup> CRPG CNRS – CNRS : UMR7358 – France

<sup>3</sup> School of Earth Sciences – Éthiopie

<sup>4</sup> Yemen Geological Survey and mineral Resources Board – Yémen

<sup>5</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) – France

The Afro-Arabian rift system is characterised by complex interactions between magmatism and rifting, leading to long-term segmentation of margins. Past studies focused on specific rift segments and no attempt has yet been made to reconcile them into a single, comprehensive geodynamic model. To address this, we present interpretations of seismic profiles offshore the Eritrea-Yemeni margins in the Red Sea and the western Yemeni margin in the Gulf of Aden. And we also synthesized literature data in order to build a comprehensive geodynamic model of the Afar region that emphasizes the importance of the early syn-rift transform fault zones. It has been shown that 3 types of transform fault zones exist: type 1 form during late syn-rift to early Ocean-Continent Transition (OCT) times, type 2 form during the OCT formation, and type 3 form during post-rift times. In the study area, continental transform fault zones are recognized such as the Shukra El Sheik transform fault zone during Oligo-Miocene times. Such features can also induce delay and differences in volumes of erupted magmas during rifting. Moreover, difference in crustal thinning in a given region can have a major influence on the amount of magma erupted during rifting. In this frame, it is critical to better understand how the deformation is spatially distributed at magmatic continental margins and rifts to better constrain the respective role of lithospheric deformation and asthenospheric processes on the magmatism distribution. Emphasis is put on the role of two major transform zones, Erta'Ale- Alayta (EATZ) and Shukra-El-Sheik (SESFZ), in structuring the volcanic and faulting patterns of the associated rifted-margins. We suggest that the EATZ and SESFZ were active since the earliest phase of extension. They controlled the emplacement of volcanism immediately after the Traps emplacement focusing the thermal anomaly and influencing the style of rifting (wide vs narrow rift). Thus, we outline the potential of early transform fault zones, active since the earliest stages of continental extension, in controlling the development of proto-Seaward Dipping Reflectors and areas of preferential crustal thinning, which in turn could trigger the eruption of more volumes of lava. Potentially, such transform fault zones may control the emplacement of late Seaward Dipping Reflectors and the onset of oceanic spreading.

**Mots-Clés:** Rifted margin, SDR, Segmentation, Afar, Aden, Southern Red Sea margin, Transform zones

\*Intervenant

## 3D structures of the Northern Atlantic rifting at the Galicia margin

Gaël Lymer <sup>\*1</sup>, Derren Cresswell <sup>1</sup>, Tim Reston <sup>1</sup>, Carl Stevenson <sup>1</sup>, Jon Bull <sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Geography, Earth and Environmental Sciences, University of Birmingham – Royaume-Uni

The rifting and breakup of the continents to form new ocean basins are fundamental aspects of the plate tectonics. Many of the key concepts of continental breakup have been based on two-dimensional (2D) numerical models, 2D datasets and industry data not designed to address the key scientific questions, or structural reconstructions from observations on the field where continental orogeny has uplifted fossils rifted-margins. The sediment-starved, magma-poor, Galicia margin, west of Spain, provides an optimal setup to observe *in situ* rifted structures with reflection seismic data. In 2013, an international academic consortium led to the acquisition of a bespoke three-dimensional (3D) seismic volume, designed to reveal the 3D detailed mechanisms of rifting in the area of the leg ODP 103 expedition.

The 3D volume has been processed through to prestack time migration, followed by depth conversion using velocities extracted from velocity models based on wide-angle data. The 3D data image the upward propagation of the extensional faults from a band of bright discontinuous reflections, termed collectively the S reflector, identified as the local crust-mantle boundary and a possible detachment fault. The 3D topographic and amplitude maps of the S reveal a series of slip surface "corrugations", typically known to parallel the displacement direction on major slip surfaces. The orientation of the corrugations changes oceanward, from E-W to ESE-WNW, and remains approximately perpendicular to the strikes of the faults. This change can be related to a variation in the slip direction during the rifting. Mapping the main block-bounding faults and measuring their heaves reveal a higher displacement in the south of the dataset, associated with a thinner basement in the south. In some of the deepest half-grabens structuring the margin, the crust has been completely fragmented and the syn-rift sediments lie directly on to the mantle. In the most distal part of the dataset, the S is abruptly interrupted where ridges of serpentized mantle are tectonically exhumed.

The 3D data allow to address the structural, sedimentary and kinematics aspects of the rifting, particularly during the final stage of continental extension. Our results show that rifting was a spatial and temporal variant event, thus requiring to consider the three dimensions features of the system to fully understand the processes of thinning of the continental lithosphere at rifted margins.

**Mots-Clés:** Rifting, 3d seismic reflection, detachment faults, Atlantic Ocean

<sup>\*</sup>Intervenant

## The geological record of lithospheric break-up: new perspectives from a 3D seismic view

Emmanuel Masini <sup>\*1</sup>, Marc Lescanne <sup>1</sup>, Simon Tomasi <sup>2</sup>, Suzanne Picazo <sup>3</sup>, Luc Lavier <sup>4</sup>

<sup>1</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – France

<sup>2</sup> Institut de physique du globe de Strasbourg (IPGS) – université de Strasbourg – France

<sup>3</sup> Institut des Sciences de la Terre de Lausanne (UNIL) – Suisse

<sup>4</sup> Jackson School of Geosciences, Austin, TX – États-Unis

In the last two decades, the availability of high-quality seismic data, drilling results compared to fossil analogues reshaped our ideas of both rifting and drifting in their actual variability. By contrast, the transition between these two phases, the so-called lithospheric break-up, remains debated. This major phase is geologically recorded along the Ocean Continent transition (OCT) where subsurface data is generally owned by industry. However, to better assess how extension, magmatism and sedimentation are interacting during this critical "event" is a major concern for industry as one of the last frontiers for oil and gas exploration along margins. We intend to assess the modality of lithospheric break-up by studying a world-class 3D seismic survey in a segment of a rifted margin exposed in the Equatorial Atlantic. Analyzing these data, we can explore in details the OCT architecture from a magma-poor hyper-extended margin (with exhumed mantle) to a layered oceanic crust. It is characterized by 1- the development of in-sequence landward-dipping detachment systems that crosscut former rift structures, 2- the increasing magmatic additions oceanwards (intrusives and extrusives) that progressively mimics "SDRs" geometries. With increased magmatic budget, divergence is less and less accommodated by tectonic exhumation. Therefore, magmatic-sedimentary architectures are changing from supra-detachment (i.e. hyper-extension / "SDRs"-like) to magmatic half-grabens (low-crustal extension, high magma additions) until the ultimate layered oceanic crust (almost no crustal extension, full magmatic accretion). Mechanically, 1) the listric shape of "lithospheric break-up faults", 2) the evidences of ductile shearing at their decoupling depth and 3) syn-kinematic magmatism, suggest that lithospheric stretching is decoupled by a newly formed intra-mantle brittle-ductile interface. This intra-mantle decollement may mark a critical thermal state above the rising Asthenosphere coeval with the onset of symmetric extension and may be the precursor of the future spreading axis.

**Mots-Clés:** Lithospheric break up, OCT, hyperextension, magmatism, Equatorial Atlantic

<sup>\*</sup>Intervenant

## Les mécanismes de la rupture continentale : comparaison entre les marges de Mer de Chine et d'Ibérie-Terre Neuve

Geoffroy Mohn <sup>\*1</sup>, Michael Nirrengarten <sup>2</sup>, Hans-Christian Larsen <sup>3</sup>, Weiwei Ding <sup>4</sup>,  
Iodp Expedition 367-368 Scientists <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géosciences et Environnement Cergy (GEC) – Université de Cergy Pontoise : EA4506 – France <sup>2</sup>

<sup>3</sup> Geological Survey of Denmark and Greenland, – Danemark

<sup>4</sup> Key Laboratory of Submarine Geoscience, Second Institute of Oceanography (SIO), State Oceanic, Administration (SOA) – Chine

<sup>5</sup> International Ocean Discovery Program (College Station) – États-Unis

Les mécanismes de rupture de la lithosphère continentale représentent une question fondamentale. L'amélioration de l'imagerie sismique dans les marges passives a permis de mettre en évidence l'architecture variable des Transitions Continent-Océan (TCO). Néanmoins les différents processus contrôlant la rupture continentale restent encore mal contraints résultant partiellement du manque de validation des modèles proposés par forages.

Dans cette optique, les marges Ibérie-Terre Neuve et Mer de Chine représentent deux laboratoires de premier plan. Le premier a fait l'objet de 4 expéditions ODP/IODP dans la TCO ayant permis d'améliorer grandement les modèles tectono-magmatique de la rupture continentale. Le deuxième a fait l'objet au printemps 2017 de deux expéditions IODP (legs 367 et 368) investiguant la marge distale nord de la Mer de Chine méridionale.

La TCO des marges Ibérie-Terre Neuve est caractérisée par une large zone de manteau exhumé associé à un retard relatif du système magmatique amenant finalement à la rupture continentale. Au contraire, les premiers résultats de la marge Nord de la Mer de Chine suggèrent une architecture toute différente. Elle se caractérise par un passage abrupt entre une croûte continentale amincie et la première croûte océanique lors d'un rifting rapide.

Ces résultats confirment que les modèles développés sur les marges Ibérie-Terre Neuve ne peuvent être appliqués directement. Dans cette contribution, nous comparons notamment les différents timings du magmatisme relatif à l'évolution du rifting, les taux d'extension, les conditions pré-rift de la lithosphère entre ces deux marges. Le rôle de chacun de ces paramètres sera investigué avec pour enjeu une meilleure compréhension des modes de la rupture la lithosphère continentale.

**Mots-Clés:** Océanisation, Mer de Chine, Ibérie, Terre Neuve

\*Intervenant

## Along-axis variability in rift structure and crustal composition of the Eastern Black Sea Basin: new insights from long-offset seismic reflection data

Vanessa Monteleone <sup>\*ψ1,2</sup>, Tim A. Minshull <sup>\*1</sup>, Hector Marin Moreno <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> National Oceanography Centre Southampton, University of Southampton, Southampton SO14 3ZH, UK. – Royaume-Uni

The crustal configuration of rifted margins is the result of a complex trade-off between extension rate and lithospheric compositional variation, which both influence the thermal structure and strength of the lithosphere. Despite this complexity, defining the nature of the lithosphere and the structure beneath extensional basins is important to understand how the uppermost lithosphere deforms under extension. Geophysical data can be used to identify patterns of extension within the continental crust, to differentiate crustal types, and to constrain the degree of magmatic addition to the stretched lithosphere. In the Eastern Black Sea Basin (EBSB) there is still uncertainty about whether rifting generated oceanic spreading and, if so, the extent of oceanic and stretched continental crust. We use 2D long-offset seismic reflection profiles, acquired by Geology Without Limits (GWL) and ION GXT in 2011, to investigate the nature and structure of the crust in the EBSB. We mapped the distribution of deep syn- and post-kinematic sequences and associated unconformities, which provide an important record of the timing of rifting and help to constrain the boundaries between crustal domains. Our identification of crustal domains and their distribution across the basin is supported by an analysis of basement morphology. In the EBSB, the basement reflection changes along a NW-SE direction, highlighting the presence of three different crustal domains from thinned continental crust in the NW to transitional crust and then "normal" oceanic crust in the SE. Velocity information from previous studies also shows a transition from a thin crust (7-9 km) with continental velocities ( $\sim$ 6.4-6.6 km/s) in the NW, to a thicker crust (11-13 km) associated with velocities consistent with "normal" oceanic crust (lower crust  $\sim$  6.87.2 km/s) in the SE. Below the basement, discontinuous intra-crustal reflections are identified. Among them, the most continuous feature is a flat-lying, SW-trending structure which is interpreted as a detachment, suggesting asymmetry during the extensional process. Towards the SE, a more symmetric structure is visible at both conjugate margins of the basin. The Moho reflection has also been imaged, shallowing at the centre of the basin (at  $\sim$  19-20 km depth) and dipping down below the basin margins. From these observations, we assess along-axis structural and compositional changes in the EBSB rift.

**Mots-Clés:** Eastern Black Sea, rifting structure, crustal composition, oceanic

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: v.monteleone@soton.ac.uk

## Quel est l'enregistrement thermique de la rupture lithosphérique ? Premiers résultats des Expéditions IODP 367-368 le long de la marge nord de la mer de Chine Méridionale

Michael Nirrengarten <sup>\* ψ1</sup>, Geoffroy Mohn <sup>1</sup>, Laura Gutiérrez <sup>1</sup>, Andrea Schito <sup>2</sup>, Sveva Corrado <sup>2</sup>,  
Stephen Bowden <sup>3</sup>, Frank Despinois <sup>4</sup>, Magdalena Cretu <sup>4</sup>, Iodp Expedition 367-368 Scientists <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géosciences et Environnement Cergy (GEC) - Université de Cergy Pontoise : EA4506 - France

<sup>2</sup> Roma Tre University - Italie

<sup>3</sup> Department of Geology and Petroleum Geology [Aberdeen] - Royaume-Uni

<sup>4</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) - TOTAL - France

<sup>5</sup> International Ocean Discovery Program (College Station) - États-Unis

L'extension et la rupture lithosphérique sont des processus tectoniques majeurs aboutissant à la formation d'une nouvelle limite de plaque. Les paramètres physiques contrôlant ces mécanismes sont pour la plupart calibrés via des modèles et des observations géophysiques. Ainsi l'évolution thermique des systèmes de rifts, qui influe notamment sur la genèse des magmas et le mode de déformation des domaines les plus distaux manque de calibrations directes. Les expéditions 367 et 368 du programme IODP (International Ocean Discovery Program) ont permis l'échantillonnage des unités sédimentaires ainsi que des roches du socle de la marge distale nord de la Mer de Chine Méridionale. Ces données offrent un accès direct aux roches ainsi qu'aux processus tectoniques, sédimentaires et magmatiques lors de la rupture lithosphérique. Cette étude se focalise sur quatre sites de forages enregistrant la transition entre une croûte continentale amincie et la première croûte océanique. Des sédiments d'âge pré- syn- et post-rift ont été sélectionnés dans ces 4 forages. Cet échantillonnage exceptionnel, nous permet d'investiguer et d'évaluer l'impact de la remontée asthénosphérique sur la thermicité des bassins sédimentaires les plus distaux. Nous avons mis en place une étude de thermicité multi méthodes basée sur la matière organique qui inclus pyrolyse, pétrographie organique, spectroscopie Raman et des analyses de biomarqueurs. Ces techniques permettent de couvrir un large spectre de température et d'obtenir une meilleure calibration de nos résultats. Afin de déterminer des paléo-gradients géothermiques nous incorporons les données stratigraphiques issues des forages et de maturité thermique dans un modèle d'évolution thermique des bassins. Le gradient géothermique actuel au niveau de la marge Nord de la Mer de Chine Méridionale est élevé et dépasse par endroit les 90° C/km, ces gradients induisent une certaine maturité thermique malgré le faible enfouissement. Cependant l'origine de cette anomalie thermique reste encore à déterminer, pouvant être récente ou héritée de la rupture lithosphérique. Nos premiers résultats montrent un saut de maturité thermique entre les unités syn- et pré-rift. Ce saut est relié à un enfouissement important probablement pendant le Mésozoïque suivi d'une érosion avant le rifting Cénozoïque. Des variations de plus faibles ampleurs sont observées dans les unités syn- et post-rift mais demandent un échantillonnage plus rapproché pour déterminer avec précision les paléogradients et les événements thermiques majeurs enregistrés par cette marge. L'enregistrement thermique des bassins sédimentaires distaux est ainsi une donnée essentielle pour comprendre l'évolution tectono-thermique de l'amincissement et de la rupture lithosphérique.

**Mots-Clés:** Marge nord de la mer de Chine Méridionale, Processus de rupture lithosphérique, Evo- lution thermique

## From rifting to oceanisation: stratigraphic record along the northwestern fossil Adriatic Tethys margin (Central Alps)

Charlotte Ribes <sup>\*1</sup>, Gianreto Manatschal <sup>1</sup>, Jean-François Ghienne <sup>1</sup>, Gary D. Karner <sup>2</sup>,  
Christopher A Johnson <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) – UMR7516 CNRS / Université de Strasbourg / EOST – France

<sup>2</sup> ExxonMobil Upstream Research Company, PO Box 2189, Houston, TX 77252, USA – États-Unis

Architecture of magma-poor rifted margins is complex, but at the first order characteristic building blocks can be distinguish based on crustal thickness, stratigraphic and crustal architecture, geometry of rift structures, depth of penetration of faults and their relationship to intra- basement, and top-mantle reflections. Although the structural evolution of rifted margins is well constrained, the tectono-sedimentary evolution, in particular of the more distal part is less well understood. Mainly, their depositional environments, facies distribution, stratal architecture and vertical stacking patterns remain to be defined. The aim of this work is to use the well exposed NW Adriatic rifted margin preserved in the Austroalpine and Upper Penninic nappes to characterise and understand the overall spatial and temporal evolution of the sedimentary system in a rift system that show the transition from stretched to hyper-thinned crust to exhumed mantle. The presentation reviews sedimentological and structural data from the Austroalpine and Upper Penninic nappes that enable to propose a general chrono-tectono-stratigraphic framework for the syn-rift successions across the magma-poor and sediment starved NW Adriatic rifted margin. We document facies distribution and stratal patterns within the different rift domains and identify correlative surfaces linked to alloigenic controls. We evidence the influence and the controls exerted by the rifting process, in particular the structural compartmentalization and its influence on the sediment partitioning along the rifted margin. Our approach aims to deconvolute the local vs. global control on the sedimentary systems and provide a global vision of the syn-rift sequence across magma-poor rifted margins.

**Mots-Clés:** tectonostratigraphic record, rifted margin, Alps

Intervenant

## Evolution of a highly subsiding asymmetric hyper-thinned rift from its creation to its reactivation (Mauléon Basin, Western Pyrenees)

Nicolas Saspiturry <sup>\*1</sup>, Philippe Razin <sup>1</sup>, Thierry Baudin <sup>2</sup>, Olivier Serrano <sup>2</sup>, Benoît Issautier <sup>2</sup>,  
Eric Lasseur <sup>2</sup>, Sophie Leleu <sup>1</sup>, Isabelle Thinon <sup>3</sup>

<sup>1</sup> ENSEGID – Institut polytechnique de Bordeaux – 1 allée F. Daguin - 33607 Pessac Cedex, France

<sup>2</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – 3 avenue C. Guillemain- BP 36009 45060 Orléans Cedex 2, France

The Albian Mauléon basin is a privileged field laboratory to unravel the tectono-sedimentary evolution of a highly subsiding asymmetric hyper-thinned rift. The evolution of this basin is synchronous to the one of the Bay of Biscay continental margins that are characterized by a hyper-thinned continental crust and a probable exhumed mantle at the ocean-continent transition. This integrated study combines field data (sedimentological and structural analysis), a new detailed geological mapping and seismic interpretation. This work is part of the OROGEN project co-funded by TOTAL-BRGM-INSU. The field study focuses on the Iberian margin. Seismic interpretation and wells calibration along a N-S transect of the Mauléon basin allow us to image the transition with the northern conjugate European margin. The synrift sedimentary record differs strongly on each side of the basin. The southern margin is composed of a proximal turbiditic s.l. siliciclastic system whereas the northern margin is characterized by a platform to basin carbonate system. We recognize the Mauléon rift basin as a strongly "asymmetric basin which is interpreted as related to a southward dipping Albian detachment and a northward dipping Cenomanian detachement. Two stages of continental crustal thinning are inferred to explain the development of the Mauléon rift basin. Firstly, a Barremian to Earliest Albian "ductile pure shear thinning phase", responsible for the lower crustal flowing and the formation of a symmetric sag basin. The crustal thinning identified in the Mauléon sag basin, could be linked to the lower crustal flowing towards this highly deformed and more thinned Bay of Biscay crustal domain. Secondly, an Albian simple shear thinning phase, responsible for the onset of the southward Saint-Palais detachment fault and the evolution to an asymmetric basin. Consequently, we consider that the Mauléon Albian-Cenomanian rifting affect an already thinned continental crust.

The Iberian margin appears as an upper plate and the European one as a lower plate during Albian time. At Cenomanian time, the European margin becomes the upper plate and the Iberian one the lower plate due to the shift in detachement vergence. These Albian extensive inherited structures have a major control on the Pyrenean orogeny. Our observations suggest that the Mauléon Basin is a pop-up structure resulting from the inversion of the Albian-Cenomanian detachment faults during the Late Cretaceous – Paleogene convergence.

**Mots-Clés:** Hyper, thinned, Asymmetric, Rift, Reactivation, Pyrenees

Intervenant

## Comparaison des propriétés multi-échelles de la topographie et de la bathymétrie: exemple de la Marge Est-Sarde, Mer Tyrrhénienne

Francois Schmitt <sup>\*1</sup>, Virginie Gaullier<sup>ψ 1</sup>, Fabien Graveleau<sup>φ 1</sup>, Louise Watremez<sup>§ 1</sup>, Frank Chanier <sup>¶ 1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – CNRS : UMR8187, Université des Sciences et Technologies de Lille - Université du Littoral Côte d'Opale – France

Comme beaucoup de champs géophysiques, la topographie possède d'importantes fluctuations sur une grande gamme d'échelles. Ces fluctuations sont contrôlées par différents processus géologiques, parmi lesquels la tectonique est souvent dominante. Ceci génère des surfaces qui ont des propriétés invariantes d'échelles sur une grande gamme d'échelles.

Ici nous nous focalisons sur une comparaison multi-échelle entre la bathymétrie de la mer Tyrrhénienne et la topographie de l'île adjacente, la Sardaigne. Notre objectif est d'analyser les propriétés statistiques de différents domaines topographiques le long de la Marge Est-Sarde depuis la terre jusqu'à la mer, pour estimer si des variations de ces propriétés peuvent être reliées à des processus géologiques, comme la tectonique ou les processus de surface (érosion, sédimentation). Nous utilisons des données NASA-SRTM à 90m de résolution pour la topographie, et des données CIESM-IFREMER à 100 m de résolution pour la bathymétrie. Ces données sont analysées en utilisant une méthode de fonctions de structure 2D, provenant du domaine de la turbulence. Il s'agit de considérer les moments statistiques des fluctuations de hauteur topographique, en fonction de la distance entre les deux points considérés. Ceci correspond à une généralisation de la méthode des variogrammes (qui correspond à un moment d'ordre 2, une variance). Cette approche, réalisée pour tous les couples de points appartenant à la zone d'intérêt, peut être utilisée même en cas de zone irrégulière avec des valeurs manquantes. Elle est robuste statistiquement, et permet de caractériser à la fois les fluctuations moyennes et les événements extrêmes.

Nous montrons, grâce à ces travaux préliminaires, comment cette approche statistique, multi-échelle et multi-intensité, peut être utilisée pour caractériser les différents domaines structuraux de la Marge Est-Sarde afin de tenter de les mettre en relation avec leur origine géodynamique (continentale versus océanique).

**Mots-Clés:** Topographie, échelles, variogrammes généralisés, géomorphologie, statistiques

\*Intervenant

## Structural evolution of continental rifting, quantitative analysis of fault populations: insights from the central Kenya

Ahmad Shmela \*<sup>1</sup>, Douglas Paton <sup>1</sup>, Richard Collier <sup>1</sup>

<sup>1</sup> University of Leeds - Royaume-Uni

This study aims to investigate and compare fault scaling properties of three different fault populations within the central Kenya rift for the purpose of characterizing the behaviour of normal fault evolution and distribution of strain accommodation, in order to gain an insight into the development of this part of the rift. Digital elevation models DEM with 30m horizontal resolution combined with satellite images (Google Earth) are the main data used for this study, this approach is particularly useful in areas with limited or no seismic data such as the eastern branch of east African rift system. 620 fault scarp have been identified and mapped from the DEM surface, and consequently a new dataset of attributes of the present-day fault geometry were created in order to conduct quantitative and Statistical analysis on scaling relations of fault populations and discuss results with reference to the published literature. The study area has been divided into three fault population zones (zone 1, zone 2& zone 3) based upon their average fault orientations as (NNE), (NNE to NNW) and (NNW) respectively. Estimations of extensional strain along the three rift segments revealed a general progressive increase of strain from south to north. Fault length and throw populations exhibited a power-law distribution, fractal dimension of fault throw populations showed a decrease with increasing strain , which implies that the strain is increasingly localised onto larger faults as the fault system becomes more evolved as we move from south (zone 3) to north (zone 1) along the rift. However, fractal dimension of fault length populations remained almost constant in the three zones despite increasing strain, it was also observed that some isolated faults with small throw have comparable length as some bigger throw faults, these findings may imply that fault system in this central Kenya rift segment may have established their near maximum length in early stage of evolution and accumulated displacement in a later stage in accordance to near constant length fault growth model. Analysis of spatial distribution of strain exhibits a rather distributed faulting deformation in the southernmost part of the central Kenya rift (zone 3), and more localized deformation on rift flanks towards the north (zone 1). The results of this study showed that this part of the central Kenya rift displays a range of variations, not only in fault orientation, but also in the total amount of strain, strain accommodation and fault evolution along the axis of the rift, this indicates that the processes of progressive fault system maturity and strain localization onto large faults could occur even at relatively small scale of fault populations within the rift system.

**Mots-Clés:** scaling properties, strain accommodation, normal fault growth, rift evolution

\*Intervenant

## Architecture and segmentation along the Northern Bay of Biscay passive margin

Julie Tugend <sup>\*1,2</sup>, Emmanuel Masini <sup>2</sup>, Sylvie Leroy <sup>1</sup>, Laurent Jolivet <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTEPI) – Sorbonne Universités, UPMC Université Paris 6, Centre national de la recherche scientifique - CNRS (France) : UMR7193 – France

<sup>2</sup> TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – France

Over the past decade, several studies focused on the categorisation of rifted margin architecture into structural rift domains by pointing out first-order characteristic features mainly based on tectono-stratigraphic observations and crustal thickness variations. If similar rift domains can be identified, they may still present significant morpho-structural variabilities along strike, defining different segments of the same passive margin. The limit between two segments is usually defined by transforms or transfer faults, but in many cases, the linkage between margin segments is difficult to identify and map precisely and seems to extend over a wide area.

We focus on the northern Bay of Biscay that present significant changes in architecture along strike between the Western Approach and Armorican passive margin segments. The Bay of Biscay corresponds to a small oceanic basin that formed subsequently to a Late Jurassic to Early Cretaceous rifting and Aptian-Albian oceanic spreading onset. We interpret a series of reflection seismic sections to characterize the structural and stratigraphic variability related to segment transitions. First results reveal a complex structural pattern characterized by conjugate V-shape sub-basins delimited by horst-like structures that define loose segment transitions. The overall structural change observed along the northern Bay of Biscay margin is tentatively interpreted as a transition from lower to upper plate architecture between Western Approach and Armorican passive margin segments.

Eventually, this work highlights the complex structural partitioning related to margin segmentation and some consequences on rifted margin architecture. The parameters controlling this segmentation need to be further investigated, but the occurrence of Variscan structures near the transition suggest a potential control of pre-rift crustal or lithospheric heterogeneities. As this area was only mildly tightened during the Late Cretaceous to Cenozoic convergence, it could serve as an analogue to unravel the effect of rift segmentation during inversion and orogen formation.

**Mots-Clés:** Rifted margin, Segmentation, Bay of Biscay, Western Approach margin, Armorican margin

<sup>\*</sup>Intervenant



## Opening of the Porcupine Basin – Numerical and analogue models

Bruno Vendeville <sup>\*1</sup>, Tom Detollenaire <sup>1</sup>, Louise Watremez <sup>1</sup>, Laetitia Le Pourhiet <sup>2</sup>, Cédric Bulois<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – CNRS : UMR8187, Université des Sciences et Technologies de Lille - Université du Littoral Côte d'Opale – France

<sup>2</sup> Sorbonne Université, CNRS, Institut des Sciences de la Terre de Paris, ISTEPI, Paris, France (ISTEPI) – Sorbonne Université, CNRS – France

The Porcupine Basin is a narrow, abandoned rift located offshore Western Ireland, and has, in map view an inverted "V" shape (wide in the South and narrowing towards the North). New seismic refraction models have imaged the crustal structure throughout the basin, and the probable presence of some oceanic crust in the center of the basin's southern part. Interpretation of seismic-reflection data near the northern end of the rift (1) allows the definition of morpho-tectonic structures with higher resolution and (2) indicates that the rift propagated Northward. These observations provide a better understanding of the history of the rifting and the role of the far-field forces and boundary conditions that led to its peculiar geometry and evolution.. The aim of this study is to understand the parameters controlling the propagation of the rifting, and we have investigated how a continental rift starts, propagates and even generates some oceanic crust before finally failing. Here, we compare the available geological and geophysical observations with preliminary results of analogue models and 3-D numerical simulations of the rift propagation.

**Mots-Clés:** Atlantic rifting, Porcupine basin, numerical modelling, analogue modeling

<sup>\*</sup>Intervenant

## Deep-structure of the East-Limpopo margin, Mozambique (the PAMELA project)

Louise Watremez <sup>\*ψ1</sup>, Sylvie Leroy <sup>2</sup>, Elia D'acremont <sup>2</sup>, Mikael Evain <sup>3</sup>, Angélique Leprêtre <sup>3</sup>, Fanny Verrier <sup>3</sup>, Daniel Aslanian <sup>3</sup>, Nuno Dias <sup>4</sup>, Alexandra Afilhado <sup>5</sup>, Philippe Schnurle <sup>3</sup>, Raymi Castilla <sup>6</sup>, Frank Despinois <sup>7</sup>, Maryline Moulin <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - CNRS : UMR8187, Université des Sciences et Technologies de Lille - Université du Littoral Côte d'Opale - France

<sup>2</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTEPI) - NRS : UMR7193, Sorbonne Université UPMC Paris VI - France

<sup>3</sup> Ifremer (Géosciences Marines) - France

<sup>4</sup> Instituto Dom Luis, Faculdade das Ciencias de Universidade de Lisboa (IDL) - Portugal

<sup>5</sup> Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL) - Portugal

<sup>6</sup> Géo-énergie - Suisse

<sup>7</sup> Total EP - TOTAL, CSTJF, Pau - France

The break-up of the Gondwana supercontinent resulted in the formation of the Mozambique passive margin as Africa and Antarctica were separated during the mid-Jurassic period. Although plate kinematics during the oceanisation phase are relatively well constrained, the initial fit of Africa and Antarctica, their earliest relative movements and margin architectures remain sparsely and/or fully unknown.

Two velocity models, together with coincident seismic reflection and potential field data, allow (1) to delineate the major crustal domains in the Limpopo region of the Mozambique margin, (2) to constrain velocities and major interfaces down to the Moho discontinuity and (3) to observe the along-strike variations of the deep structures as well as the amounts of magmatism.

Our results show that the Limpopo Mozambique passive margin is characterised by (1) deep basins (up to 12 km), which are controlled by normal faults, and by (2) magmatic sills and volcanoclastic material. The necking of the continental crust is narrow and is probably characterised by the presence of magmatic underplating at the base of the crust (upper mantle velocities of 7.3-7.6 km/s, complex wide-angle Moho reflectivity). We observe some extensional structures in the continental domain along both lines (deep landward dipping sedimentary basin, graben/half graben structures). We identify a transitional domain along both lines. However, we believe that this domain is probably oceanic. Oceanic crust is identified along both lines with typical oceanic layering; only, this crust is thicker than normal (8-9 km in the north and 10-13 km in the south), which means a higher than normal magma supply. The oceanic crust is thicker in the south than in the north, implying that magmatism is more intense in the oceanic domain along the southern profile than the northern one. \*The PAMELA project (PAssive Margin Exploration Laboratories) is a scientific project led by Ifremer and TOTAL in collaboration with Université de Bretagne Occidentale, Université Rennes 1, Université Pierre and Marie Curie, CNRS and IFPEN.

Moulin, M., Aslanian, D., et al 2016. PAMELA-MOZ03 cruise, RV Pourquoi pas ?, <http://dx.doi.org/10.17600/> Moulin, M., Evain, M., et al. 2016. PAMELA-MOZ05 cruise, RV Pourquoi pas ?, <http://dx.doi.org/10.17600/1>

**Mots-Clés:** Mozambique, Passive margin, Seismic velocities, Crustal structure

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: louise.watremez@univ-lille.fr

## Deep structure of the Porcupine Basin from seismic refraction data

Louise Watremez <sup>\*ψ1</sup>, Manel Prada <sup>2,3</sup>, Chen Chen <sup>4</sup>, Timothy Minshull <sup>5</sup>, Brian O'reilly <sup>2,3</sup>,  
 Timothy Reston <sup>6</sup>, Gerlind Wagner <sup>7</sup>, Viola Gaw <sup>7</sup>, Dirk Klaeschen <sup>7</sup>, Patrick Shannon <sup>3,8</sup>, Sergei  
 Lebedev <sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - CNRS : UMR8187, Université des Sciences et Technologies de Lille - Université du Littoral Côte d'Opale - France

<sup>2</sup> DIAS, Geophysics Section, Dublin - Irlande

<sup>3</sup> Irish Centre for Research in Applied Geosciences (iCRAG) - Irlande

<sup>4</sup> University of Southampton, National Oceanography Centre - Royaume-Uni

<sup>5</sup> University of Southampton - Royaume-Uni

<sup>6</sup> School of Geography, Earth and Environmental Sciences, University of Birmingham - Royaume-Uni

<sup>7</sup> GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel - Allemagne

<sup>8</sup> School of Earth Sciences, University College Dublin - Irlande

The Porcupine Basin is a V-shaped failed rift basin located offshore SW Ireland. It was formed during Late-Paleozoic to Cenozoic, with the main rifting phase in the Late Jurassic to Early Cretaceous.

This basin is characterised by some hyperextension, with lithospheric stretching factors of up to 6 previously estimated in the central part of the basin. Such hyperextension led to uppermost mantle serpentinisation, which was imaged along a former transect across the basin. A ridge feature is located at the centre of the southern basin, the Porcupine Median Ridge (PMR), and has been successively interpreted as a volcanic ridge, a tilted block, or a serpentinite mud diapir, with obvious implications on the thermal history of the basin.

We present results from layered travel-time tomographic modelling of five profiles: three across the whole basin, one across the south-eastern margin and one along the centre of the basin. Our results show (1) the variations of thickness of the crust, with crustal thinning factors of up to 10 in the southernmost part of the basin, (2) an asymmetry of the crustal structures together with an asymmetry in the uppermost mantle velocities, which highlights the influence of crustal faulting on amounts of serpentinisation, (3) the definition of three distinct crustal domains in the basin, from the thinned continental crust to oceanic crust in the central part of the basin, through a transitional zone, and (4) a probable igneous composition of the PMR.

Thus, this study gives a better understanding about the formation of the Porcupine Basin through the observation of the asymmetrical crustal thinning, the characterisation of the nature of the different crustal domains, the study of the amounts of serpentinisation in the uppermost mantle and the observation of magmatism. *This project was funded by the Irish Shelf Petroleum Studies Group (ISPSG) of the Irish Petroleum Infrastructure Group 4.*

**Mots-Clés:** Porcupine Basin, Failed rift, Seismic velocities, Crustal structure

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: louise.watremez@univ-lille.fr

## Architecture et fonctionnement sédimentaire de la marge Tanzanienne et des bassin Nord Comores - Somalie du Miocène à l'actuel.

Sébastien Zaragosi <sup>\*1</sup>, Léa Fournier <sup>1</sup>, Athina Tzevahirtzian <sup>1</sup>, Julien Bourget <sup>2</sup>, Elodie Marches <sup>3</sup>, Laurie Biscara <sup>3</sup>, Thierry Garlan <sup>3</sup>, Luc Beaufort <sup>4</sup>, Patrick Bachelery <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Environnements et Paléoenvironnements OCéaniques (EPOC) – Université de Bordeaux (Bordeaux, France)

<sup>2</sup> Centre for Energy Geoscience, School of Earth and Environment, The University of Western Australia (UWA)

<sup>3</sup> Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) – Ministère de la Défense – France

<sup>4</sup> Centre européen de recherche et d'enseignement de géosciences de l'environnement (CEREGE) – Aix Marseille Université, INSU, Institut de recherche pour le développement [IRD], CNRS : UMR6635 –

Europôle Méditerranéen de l'Arbois - Avenue Louis Philibert - BP 80 - 13545 Aix-en-Provence cedex 4, France

<sup>5</sup> Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) – Institut national des sciences de l'Univers : UMR6524, Université Jean Monnet [Saint-Etienne], France

Le rift-est africain berceau des plus grands fleuves africains (Nil, Zaïre et Zambèze) est également la source de fleuves plus modestes alimentant la marge tanzanienne : les fleuves Rufiji et Rovuma. Le système de dépôts profonds issus de ces fleuves, le système turbiditique Rovuma-Rufiji, n'est pas encore totalement connu, ses parties distales ont été pour l'instant cartographiées jusque dans le bassin de Somalie, à plus de 1 200 km de l'embouchure de fleuves. L'histoire de ce système turbiditique est intimement lié à l'initiation et à l'évolution du rifting est-africain. En effet le début de sa mise en place est synchrone de l'accélération du rifting au Miocène inférieur. L'activité du rift affecte l'érosion dans les bassins versants mais également l'architecture de ce système turbiditique. La complexité de la marge avec la présence de plusieurs grabens intra-pente (les bassins de Makonde, Kilwa et Kerimbas) et la présence de ride de Davie lui donnent une morphologie atypique. De plus la découverte de nombreux paléo-chenaux sur le flanc est de la ride de Davie a permis de faire le lien entre la surrection et le développement de cette ride vers le nord et la migration du système turbiditique Rovuma-Rufiji vers le nord également.

Le bassin de Somalie est également alimenté par une deuxième source sédimentaire : l'archipel volcanique des Comores, dont les dépôts volcanoclastiques ont été repérés à plus de 350 km au nord de l'archipel et à proximité du système turbiditique de Rovuma-Rufiji. Le développement de l'archipel vers l'ouest depuis le Miocène, également lié au rifting-est africain, a entraîné la séparation des bassins de Somalie et du Mozambique.

Ainsi la présence de la partie off-shore du rift, le développement de la ride de Davie et de l'archipel des Comores sont autant de facteurs permettant d'expliquer la position des dépôts actuels et l'architecture atypique du système turbiditique Rovuma-Rufiji.

**Mots-Clés:** Rift, est africain, Archipel des Comores, Système turbiditique Rovuma, Rufiji

<sup>\*</sup>Intervenant

## **2.5. De l'arrière- à l'avant-arc : tectonique et sédimentation des zones de subduction**

## Early - stages of the Santa Elena outer wedge development linked to accretion of a sliver from the Late Cretaceous - Caribbean Large Igneous Province (CLIP): SW Ecuador – NW Perú

Carlos Alberto Aizprua Luna <sup>\*2,1</sup>, César Witt <sup>2</sup>, Ståle Johansen <sup>2</sup>

<sup>2</sup> Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, F 59000 Lille, France –

<sup>1</sup> Department of Geosciences and Petroleum, Norwegian University of science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway. (NTNU) – Norvège

The Ecuador-Peru region is identified as the southernmost place where the Caribbean Large Igneous Province (CLIP) interacted with the South American margin since Late Cretaceous. The accretion of parts of the CLIP against the South American margin lead to the entrapment of a crustal sliver in between the trench and the continent forming the underlying crustal basement of the forearc region in western Ecuador. This work reviews previous works in order to propose a regional integration of the structural architecture of SW Ecuador and NNW Peru. It also analyses how the structural configuration that resulted from the CLIP – trench collision influences the forearc basin stratigraphy, throughout the study of different seismic vintages, potential field data and outcrop stratigraphy. Results from our integrated approach, highlight two main structural domains: (1) a highly deformed area with different compressional strike directions, sharp erosional events, and kilometric uplift followed by major stratigraphic gaps; and (2) a series of transtensional basins surrounding the domain in (1). Our results support the idea that the early-stages of forearc development may have been driven by instability of a triple-plate junction which lead to local development of an actively deforming outer wedge along the SW Ecuador and NW of Peru. Plate stability, through trench retreat may have been reached by the middle to late Eocene, followed by development of transtensional basins due to strain partitioning from oblique subduction, a process that may still be ongoing. The relatively local character of the deformed series, which conforms the Santa Elena outer wedge (approx. 100-150 km in extent) prevents to define this area as part of a regional accretionary prism; and instead a more local model is proposed where turbidites and mass-transport systems were deposited across a margin offset resulting from the accreted oceanic sliver. The region is a remarkable place to study past geological processes associated to oceanic plateau – trench collision and its posterior role on strain partitioning and evolution of forearc sedimentary basins.

**Mots-Clés:** accretion, forearc, outer wedge

Intervenant

## Tectono-stratigraphic evolution along a trench-linked sheared margin: Gulf of Guayaquil-Tumbes basin, Northern Andes, Ecuador-Peru

Carlos Alberto Aizprua Luna <sup>\*1,2</sup>, César Witt <sup>1/2</sup>, Jean-Yves Reynaud <sup>φ2</sup>

<sup>1</sup> Norwegian University of Science and Technology [Trondheim] (NTNU) – Norvège

<sup>2</sup> Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, F

It has been recognized that obliquity between convergent plates along active margins results on strain partitioning, both normal and parallel to the trench. These sheared margins may develop large scale strike-slip faults which can be prolonged for hundreds of kilometres along the volcanic arc, and very likely bounding different forearc crustal slivers. The mechanisms for its development have been discussed and well documented in regions such as: offshore Sumatra, and Northern Andes, to mention some examples.

From such studies, it seems that strike-slip faults may play a great role on the observed deformation styles along the arc. However, their link to the trench and impact on the forearc tectonic-stratigraphic evolution is poorly understood. At early stages of forearc development it is common to observe that different active margins share a tectonic history which involve a shift from a pure accretionary-type margin to extensional or transtensional deformation, commonly associated to changes on plate directions and velocity. Nevertheless, very few studies discuss the formation of sedimentary basins along a trench-linked sheared margin in relationship to the suture of an allochthonous terrane to the continental margin.

In the Northern Andes, a Late Cretaceous oceanic plateau sliver underlies the forearc region of SW Ecuador, with a southern limit interacting with the continental basement of South America. The Gulf of Guayaquil is located along the inferred suture providing a unique opportunity to study the impact of a trench-linked basin underlain by an oceanic-continental suture. Based on multi-channel seismic profiles, industrial borehole data, surface rock exposures, and recent radiometric age results, we attempt to make a paleogeographic reconstruction of the early stage of tectonic escape at the southern edge of the Northern Andes sliver, along the Gulf of Guayaquil basin in SW Ecuador and NW Peru.

The geological record of rapid shallowing of the forearc from deep marine deposits into fluvio-deltaic successions during Oligocene is followed by the development of perched extensional basins such as the Gulf of Guayaquil in SW Ecuador and Zorritos basin in NW Peru. Our stratigraphic analysis and recent radiometric U/Pb results support a southward transgression of the fluvio-deltaic system in the middle Miocene. This event may mark the transition from an established forearc basin to a transtensional basin possibly associated to the early stage of a tectonic escape throughout fault reactivation along the suture.

**Mots-Clés:** Fore, arc basin, strike, slip faults, suture, seismic sequence stratigraphy

## L'enregistrement tectono-sédimentaire mio-pléistocène de Hawke Bay, pendant la subduction du plateau océanique Hikurangi

Christophe Buret <sup>\*1</sup>, Vincent Caron, Geoffroy Mahieux <sup>2</sup>, Frank Chanier <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Picardie Jules Verne (UPJV) - France

<sup>2</sup> EA7511 Bassin-Réservoir-Ressource UPJV-UniLaSalle - University of Picardie Jules-Verne - France

<sup>3</sup> - UMR CNRS 8187 - Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, France

Débutée il y a 25 Ma, la subduction du plateau océanique épais d'Hikurangi se produit au niveau de la fosse Hikurangi à l'est de l'Île du Nord. Le plateau Hikurangi devient plus au nord une plaque océanique classique subduite au niveau de la fosse de Kermadec, prolongation septentrionale de la fosse Hikurangi. La rotation des blocs tectoniques dans l'Île du Nord (0,5 à 3,8 deg Ma-1), tournant dans le sens des aiguilles d'une montre, se produit en raison du changement de caractère de la plaque de subduction le long de la marge. Hawke Bay forme une grande baie (140 km de long) bornée au nord et au sud par la péninsule de Mahia et le Cap Kidnappers. Hawke Bay se situe sur le Raukumara bloc, intercalé entre l'Axial Ranges Bloc à l'ouest et le Central Hikurangi bloc à l'est. Cette baie s'ouvrant dans ce contexte de convergence va venir immerger les séries mio-pliocènes du bassin d'avant-arc, se faisant elle interrompt physiographiquement la connexion et la continuité entre les séries mio-pliocènes émergées au nord et au sud. En effet, la partie supérieure du remplissage du bassin d'avant-arc associé à cette subduction se situe dans la région d'Hawke Bay. Ce sont de puissants corps sédimentaires d'âge Plio-Pléistocène de plusieurs kilomètres d'épaisseur. Bien que dominés par des dépôts silicoclastiques, une production de sédiments carbonatés de type bryomol et barnamol s'est développée de façon récurrente en association avec des hauts-fonds structuraux sur les bords d'un bras de mer s'étendant sur plus de 300 km du NE au SO. Divertement déformés, les calcaires plio- pléistocènes sont bien documentés dans les parties centrales et méridionales d'Hawke Bay. Ils constituent d'excellentes roches réservoirs caractérisées par un potentiel diagénétique faible, et par des porosités et des perméabilités élevées. Les sédiments carbonatés de la partie septentrionale sont au contraire faiblement documentés et devraient enregistrer les pulsations tectoniques de la même manière, permettant de discriminer la transition entre une phase subsidente Miocène suivie de la surrection brutale de toute la marge à la limite Mio-Pliocène. La cartographie des discontinuités majeures permettra de discriminer les taux de surrection affectant le « Raukumara block ».

\*Intervenant

## Lowstand and transgressive carbonates identified from physical and taphonomic characterization of Rhodolith-bearing beds: the late Early Miocene (Burdigalian) of the Pongaroa area (North Island, New Zealand)

Vincent Caron <sup>\*1</sup>, Julien Bailleul <sup>2</sup>, Frank Chanier <sup>3</sup>, Geoffroy Mahieux <sup>1</sup>, Christophe Buret <sup>§2</sup>

<sup>1</sup> University of Picardie Jules-Verne – University of Picardie Jules-Verne – Chemin du Thil, 80000 Amiens, France

<sup>2</sup> UMR2018-C100 Bassin-Réservoirs-Ressources, Département Géosciences, Institut Polytechnique LaSalle Beauvais

<sup>3</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – CNRS : UMR8187, Université de Lille - ULCO – France

Rhodoliths are commonly used in palaeoenvironmental and palaeoecological reconstructions but rhodolithic deposits are more rarely tied to specific portions of relative sea-level curves. The present study assesses the stratigraphic significance of Rhodolithic limestones whose occurrences are associated with structurally-controlled paleohighs. Limestones are usually of limited lateral extent and exhibit thicknesses ranging from one to tens of meters. They are described in terms of biogenic components and taphonomic analysis of rhodoliths. The characterization of coralline algal assemblages involved description of growth forms, reconstruction of growing stages using abrasion and dissolution surfaces, identification of algal taxons and bioeroders. Rhodolithic beds are discontinuous, locally channelized; some were deposited in subsiding depocenters while others accumulated on submerged palaeotopographic highs. They commonly consist of two superposed units: basal unit A occurs across a sharp and/or erosional burrowed surface on mid-shelfal to bathyal siliciclastic deposits, and is overlain by unit B resting on a prominent unconformity at the base of deepening-upwards flysch successions. Units A and B are interpreted as lowstand and transgressive deposits, respectively, from their physical characteristics as given above combined with their sedimentary properties described below.

Unit A deposits range in texture from mixed siliciclastic-skeletal packstones/grainstones of the bryozoan and foralgal assemblages to rhodolithic rudstones and floatstones with a matrix containing benthic foraminifera, bryozoan and algal fragments, and siliciclastic fine sands. Rhodoliths from Unit A are sub-spheroidal to ellipsoidal, and usually consist of loosely to densely packed columnar and lamellar coralline thalli with low to moderate bioeroder infestation, and with low to moderate abrasion of their outer surface. Unit A deposits are correlated to variable environmental conditions from low to high-energy settings subjected to wave abrasion processes. Unit B deposits are rhodolithic rudstones and floatstones locally containing abundant glauconitic grains, thick-shelled benthic foraminifera, and bored pebbles reworked from Cretaceous and Oligocene substrates. Rhodoliths are spheroidal to sub-spheroidal with a compact concentric constructional structure. Their taphonomic properties, including encrustation, multiple growth stages bounded by abrasion and in places dissolution surfaces, intense bioerosion, ichnofossil assemblages, and internal sediments point to a complex depositional history from very shallow high-energy waters to locally emersion, and finally to deepening low-energy settings.

**Mots-Clés:** rhodoliths, sequence stratigraphy, tectonics, sedimentation interactions, trench, slope basins

## Insights on the different styles of mass-transport deposits in trench-slope basins: example from the active Hikurangi margin, New Zealand, using outcrop analogues and offshore seismic interpretation

Barbara Claussmann <sup>\*ψ1,2</sup>, Julien Bailleul <sup>1</sup>, Frank Chanier <sup>3</sup>, Geoffroy Mahieux <sup>4</sup>, Adam Mcarthur <sup>5</sup>, Bruno Vendeville <sup>3</sup>

<sup>1</sup> EA 7511, Basins-Reservoirs-Resources (B2R), Geosciences department, UniLaSalle, Beauvais, France

<sup>2</sup> Schlumberger, Software Integrated Solutions, London, SW1E 6AJ, United Kingdom – Royaume-Uni

<sup>3</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - UMR 8187 (LOG) - Université du Littoral Côte d'Opale, Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8187 – France

<sup>4</sup> EA 7511, Basins-Reservoirs-Resources (B2R), University of Picardie Jules Verne, Amiens, France

<sup>5</sup> School of Earth and Environment, University of Leeds, Leeds, LS2 9JT, United Kingdom – Royaume-Uni

Gravity-driven sedimentary processes, such as submarine mass-movements and turbidity currents are recognized to be critical agents of sediment reworking, transport, and deposition within slope systems. However, few studies integrate both outcrop analogues and offshore seismic reflection data to further investigate the relationship between the deposition of syn-subduction mass-transport deposits (MTDs) and turbidite systems. Along active margins, the basin-fill architecture of the subduction wedge trench-slope basins is fundamentally controlled by the subduction processes and related tectonic deformation. Sediment distribution and stratigraphic architecture are therefore complicated by the interactions between predominant deformation, eustatic changes, and high sediment flux, potentially triggered by the gravity-driven sedimentary processes. The Hikurangi subduction wedge has been developing over the last 25 Ma as the result of the westward subduction of the Pacific plate beneath the Australian Plate. It belongs to the East Coast Basin petroleum province, a frontier basin under current exploration, where new 2D seismic data were recently acquired by WesternGeco. Mainly present offshore, the subduction wedge also features the emergence of its trench-slope break onshore in the Coastal Ranges of the North Island, thereby offering a unique opportunity to study well-exposed coastal outcrops of trench-slope basin fills. This study focuses on insights derived from different yet complementary scales of observation and resolutions (i.e., outcrop analogues and offshore seismic) to better understand and constrain the different styles of syn-subduction MTDs and their interactions with the turbidite lobe and channel deposits. A variety of submarine mass-movements deposits and associated deformations were observed in the Coastal Ranges, mainly ranging from moderately deformed (e.g., slump) to completely disaggregated (i.e., debris flow and mud flow) deposits. The diversity observed in shape, size, lithology, nature of reworked material, and interactions with the under- and overlying turbidite systems suggests that different triggering mechanisms and sedimentary processes interplayed. By combining the offshore seismic reflection data with the outcrop observations, we can gain a better assessment of the MTDs, revealing further insights about their geometries, lateral evolution, stratigraphic distribution, and relationships with the tectonic structures. Thus, such study may have major implications for the understanding of stratigraphic development on active margin systems.

**Mots-Clés:** MTDs, turbidites, syn subduction deposits, tectonics sedimentation interactions, trench slope basins

## Porosity analysis of the Lower Sediments of the Basin Entering the North Sumatran Subduction Zone from IODP Expedition 362 data and Cation Exchange Capacity

Jade Dutilleul <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Sylvain Bourlange <sup>1</sup>, Yves Géraud <sup>1</sup>

<sup>1</sup> UMR 7359 GeoRessources (GeoRessources) – Université de Lorraine, Ecole Nationale Supérieure de Géologie, Centre national de la recherche scientifique - CNRS (France) – France

In December 2004, the ~9.2 Mw interplate Sumatra-Andaman earthquake ruptured unexpectedly seaward of the North Sumatran margin beneath a wide and 4-5 km-thick forearc plateau, causing a disastrous tsunami and stressing the need to reappraise our understanding of subduction earthquakes. To better constrain the properties of input sediments driving shallow slip in North Sumatra, in 2016, International Ocean Discovery Program Expedition 362 drilled two sites ~225 kilometers seaward of the North Sumatran deformation front, allowing to collect samples and logging data from the ~1.5 km-thick input sedimentary section, composed by a basal pelagic layer (Unit III) about one hundred meters above the oceanic crust and a siliciclastic sequence of the Nicobar fan with high sediment accumulation rate (Units II and I). Porosity data measured on cores reveal a clay-rich zone in Unit III showing a positive porosity anomaly correlated with freshening evidence and with the stratigraphic extrapolation of a high-amplitude negative-polarity reflector. In Nankai and Barbados, undercompacted clay-rich layers with similar characteristics have been interpreted as overpressured fluid-rich décollement. However, total porosity measured on cores is affected by hydrous minerals and thus not representative of sediment compaction state unless a correction accounting for bound water is applied. In this study, the origin of the porosity anomaly is investigated using Cation Exchange Capacity (CEC) data to estimate interstitial porosity by correcting porosity measured on cores and porosity predicted by a resistivity model for shale also allowing to estimate fracture porosity. At the two sites, CEC data show a sharp increase in the high porosity clay-rich zone, shifting from ~15 meq/100g in Units I and II up to 50-60 meq/100g in Unit III, indicating a high smectite content in Unit III. This zone is also correlated to locally elevated silica content, suggesting the occurrence of opal. Hydrous minerals in Unit III result in a shift of bound porosity from ~5% up to at least ~20% according to CEC data, responsible for the porosity anomaly observed in this zone. In addition, the resistivity model used accounting for clay surface conductivity suggests a fracture porosity ~6% in this zone, correlated to a higher fault and fracture density. This preliminary quantification of bound, interstitial and fracture porosity is necessary to estimate the pore fluid pressure generation potential of this layer rich in hydrous minerals.

**Mots-Clés:** porosity, Sumatra, cation exchange capacity, smectite

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>#</sup>Auteur correspondant: jade.dutilleul@univ-lorraine.fr

## Long-term vertical movements and construction of the continental margin along the forearc of the central Peruvian Andes (6-10°S)

Marie Genge \*<sup>1</sup>, Cesar Witt \* <sup>ψ1</sup>, Frank Chanier <sup>φ1</sup>, Jean-Yves Reynaud <sup>§1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - UMR 8187 (LOG) - Université du Littoral Côte d'Opale, Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8187 - France

The interaction between the kinematics of subduction and forearc evolution remains poorly understood. Difficulties arise mainly because numerous factors may control the interplay between uplift and subsidence in forearc areas. The forearc of the North-Central Peruvian Andes (FNCPA, 6-10°S) provides an exceptional opportunity to study the long-term processes that affect a convergent plate boundary. First, it shows large-scale basin migration and superimposition. Second, characterized as a typical erosive margin, the FNCPA shows a complex relationship between uplift and subsidence resulting from the temporal and spatial interactions between the unroofing Paleozoic-Cretaceous Coastal Cordillera and subsidence along adjacent forearc depocenters.

Transtensive events occurred along the FNCPA from Upper Cretaceous to Oligocene. They are coeval with a high convergence obliquity period and shaped the basement fabrics through roughly trench-parallel horsts and grabens with a significant strike-slip component.

A selection of industrial seismic profiles, four wells and an ODP site core is used to define the Cenozoic tectonic evolution of the FNCPA. A long-lived episode of regional subsidence and believed to be coeval with the change to the subduction-erosion regime (~20 Ma) affected the forearc and lead to the relatively thick and lengthy deposition of the Lower Miocene. This regional subsidence may have ended during the Late Miocene due to a decrease of convergence velocity. A trench-parallel uplift of the outer part of the FNCPA encompassed preexisting horsts and grabens and occurred as soon as Middle Miocene. The uplifted zone formed an Outer Forearc High (OFH) with a complex geometry controlled by the basement fabrics and the diachroneity of uplift. The uplift of the OFH south of 8°S, individualized a basin landward, filled by Plio-Quaternary deposits, producing landward-tilted strata and unconformities in the forearc basin. The origin of this uplift may be explained either by the onset of the Peruvian slab flattening (induced by the subduction of buoyant features) increasing the plates coupling, or by the change in convergence obliquity or by an increase of basal accretion, or finally by a combination of these aspects. The uplift ended during the Pleistocene south of 8°S and is still ongoing north of 8°S.

Finally, the flat geometry of the current seafloor indicates an overfilled shelf where erosion and deposition keep pace with vertical movements along the forearc.

**Mots-Clés:** Forearc, Peru, vertical movements, transtension

## Segmentation along the Ecuadorian shelf ( $1^{\circ}20'N$ - $2^{\circ}20'S$ ) from interpretation of Satellite Altimetry and dense grid of MCS data

María José Hernández \*<sup>1,2,3</sup>, François Michaud <sup>2,4</sup>, Jean Yves Collot <sup>2</sup>, Jean-Noël Proust <sup>5</sup>,  
Elia D'acremont <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne Université - Sorbonne Universités, UPMC Université Paris 6 - France

<sup>2</sup> Université Côte d'Azur - Université Côte d'Azur, CNRS, IRD, Observatoire de la Côte d'Azur, Géoazur - France

<sup>3</sup> Escuela Politécnica Nacional - Équateur

<sup>4</sup> Sorbonne Université - Sorbonne Universités, UPMC Université Paris 6, Sorbonne Université - France

<sup>5</sup> Université de Rennes - Université de Rennes I - France

The Ecuadorian convergent margin is characterized by the subduction of the Nazca oceanic plate beneath South America at an average of 6-7 cm/year (Nocquet et al., 2014). The geodynamic evolution of the margin is influenced by the subduction of the Carnegie Ridge and by the NE migration of the North-Andean Block.

Along the continental shelf, the satellite altimetry (NGDC-NOOA, Smith & Sandwell, 2004; Sandwell et al., 2014) shows positive and negative values despite a relatively constant water depth (80-100 m), which suggests a 1st order geological and structural margin segmentation. From the analysis of Free Air Anomaly (FAA) we propose dividing the margin in 4 segments: North, Central North-South and South (Fig. 1). The interpretation of the MCS reflection profiles (Proprietary of the Secretaría Hidrocarburos del Ecuador, 4000in3 air gun seismic source, 640-channel, SP 25m, 160-fold coverage) allows us to determine the geological structures that characterize each segment. The North Segment ( $1^{\circ}20'N$ - $0^{\circ}45'N$ ) is characterized by a positive gravimetric anomaly (20 mGal, anomaly 1 in Fig.1) related to a 0.7 stwt-shallow acoustic basement. The Central-North segment ( $0^{\circ}45'N$ - $0^{\circ}45'S$ ) is defined by the presence of three negative anomalies (-30 mGals, anomalies 2, 3 and 4 in Fig.1) corresponding to 3stwt-thick sedimentary basins. The Central-South Segment ( $0^{\circ}45'S$  -  $2^{\circ}20'S$ ) is characterized by a positive gravimetric anomaly (up to 50 mGals, anomalies 5 and 7 in Fig.1) related to a 1.5 stwt-shallow acoustic basement. Finally, the South Segment ( $2^{\circ}20'S$  -  $3^{\circ}30'S$ ) is well defined by a regional negative anomaly (-80 to -150 mGals, anomaly 8 in Fig.1) that corresponds to the sedimentary fill of 6 to 7 km of thickness (Witt et al., 2006).

We identify and propose a new spatial arrangement and geometry of the principal sedimentary basins. The spatial distribution of interpreted seismic units, the deformation along regional structures and the correlation with well data allow us to discuss the timing of the segmentation along the Ecuadorian shelf.

- Deniaud, Y. (2000). *Enregistrements sédimentaire et structural de l'évolution géodynamique des Andes Equatoriennes au cours du Néogène: Etude des bassins d'avant arc et bilan de masse*. Thèse de l'Université de Grenoble (France), Géologie Alpine, Mémoire HS (32), 159p.
- Nocquet J-M, Villegas-Lanza Jc, Chlieh M, Mothes Pa, Rolandone F, Jarrin P, Cisneros D, Alvarado A, Audin L, Bondoux F, Martin X, Font Y, Re Gnier M, Vallee M, Tran T, Beauval C, Maguin~ A Mendoza Jm, Martinez W, Tavera H, Yepes H, (2014). Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes, *Nature Geosciences*, 7 (4), pp. 287-29
- Witt C, Bourgois J, Michaud F, Ordoñez M, Jiménez N. et Sosson M. (2006), Development of the Gulf of Guayaquil (Ecuador) during the Quaternary as an effect of the North Andean block tectonic escape, *Tectonics*, 25, TC3017, doi:10.1029/2004TC001723, 22 p.

**Mots-Clés:** subduction, forearc basins, Ecuador

## Recall the past to address future scientific challenges: The Core-Log-Seismic Integration at Sea IODP workshop investigates legacy data to advance our understanding of seismogenic subduction zone

Gaël Lymer <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Tatiana Maison <sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Geography, Earth and Environmental Sciences, University of Birmingham, UK – Royaume-Uni

<sup>2</sup> UniLaSalle, UPJV, EA 7511 Basins-Reservoirs-Resources (B2R), F-60026 Beauvais, France – Institut Polytechnique LaSalle Beauvais – France

Subduction zones account for 90% of global seismic moment release and generate damaging earthquakes and tsunamis with potentially disastrous effects on heavily populated coastal areas. In January-February 2018, the first IODP Core-Log-Seismic integration at Sea (CLSI@Sea) workshop gathered together onboard the D/V Chikyu multidisciplinary team of 14 early-career scientists and a group of scientific mentors specialized in subduction zone processes off the south-west coast of Japan at the Nankai Trough, one of the Earth's most active plate-subduction zones. CLSI@Sea was developed to leverage existing core, logging, and seismic data acquired during previous IODP expeditions in the Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment (NanTroSEIZE), to address the role of the deformation front of the Nankai accretionary prism in tsunamigenic earthquakes and slow slip in the shallow portion of the subduction interface. Recent findings from the 2011 Tohoku-Oki mega earthquake, at the origin of the Fukushima nuclear disaster, provided evidence that tsunamigenic slips can be continuous from the locked portion of the subduction plate boundary all the way out to the trench. Similar behavior can be expected within the NanTroSEIZE area, thus highlighting the interest to re-investigate archived IODP NanTroSEIZE data.

Stored sedimentary cores were brought on board Chikyu, to be available for new description, sampling and analysis. Logging and seismic data were also provided for investigation by workshop participants, who were granted access to Chikyu laboratory facilities and software to perform analyses at sea. CLSI@Sea resulted in the synthesis of existing geophysical, geologic, and geochemical data across the deformation front of the subduction zone. Multi-thematic presentations during the workshop allowed the identification of key outstanding research questions in the field of subduction zone seismogenesis. The international team of workshop participants was then able to develop both individual and collaborative research plans regarding seismogenic-, tsunamigenic- and slow-slip processes in the Nankai subduction zone, a crucial topic for the regional tectonics, but also a fundamental aspect of the Earth's geodynamic.

This presentation will summarize the workshop and present the ongoing new researches organized by CLSI@Sea participants during IODP expedition 380.

**Mots-Clés:** Subduction zone, Earthquakes, Tsunami, Japan trench, IODP, Workshop

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>✉</sup>Auteur correspondant: g.lymer@bham.ac.uk

## Low-grade evolution of clay minerals and organic matter in fault zones of the Hikurangi prism (New Zealand)

Tatiana Maison <sup>\*1</sup>, Sébastien Potel <sup>1</sup>, Pierre Malie <sup>2</sup>, Rafael Ferreiro Mählmann <sup>3</sup>, Frank Chanier <sup>4</sup>,  
Geoffroy Mahieux <sup>1</sup>, Julien Bailleul <sup>1</sup>

<sup>1</sup> UniLaSalle, UPJV, EA 7511 Basins-Reservoirs-Resources (B2R), F-60026 Beauvais, France – Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique – France

<sup>2</sup> Laboratoire Géosciences Université de Montpellier CC.60 Place E.Bataillon. 34095 Montpellier. Cedex 5 – Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique – France

<sup>3</sup> Technische Universität Darmstadt, Technical and low temperature petrology, Institut für Angewandte Geowissenschaften, 64287 Darmstadt, Germany – Allemagne

<sup>4</sup> Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, F 59000 Lille, France – Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique – France

Clay minerals and organic matter can frequently occur in fault zones. Their structural characteristics and their textural evolution can be driven by several formation processes (i) reaction by metasomatism from circulating fluids, (ii) in situ evolution by diagenesis, and (iii) neoformation due to deformation catalysis. Clay mineral chemistry and precipitated solid organic matter can be used as an indicator of fluid circulation in fault zones and to determine maximum temperatures reached in these zones. In this study, clay mineral and organic matter analyses of two major fault zones, the Adams-Tinui and Whakataki faults, Wairarapa, North Island, New Zealand are studied. The two faults analyzed correspond to the soles of large imbricated thrust sheets formed during the onset of subduction beneath the North Island of New Zealand. The mineralogy of both fault zones is mainly composed of quartz, feldspars, calcite, chabazite and clay minerals such as illite/muscovite, kaolinite, chlorite and mixed layers like chlorite/smectite and illite/smectite. The diagenesis and very-low grade of sedimentary rock is determined by gradual changes of clay "crystallinities" (illite, chlorite, kaolinite), the use of chlorite geothermometer, and the reflectance of organic matter. From this study, it can be concluded that: (i) the thermal grade established is diagenesis; (ii) tectonic strains affect the clay "crystallinity" in the fault zone; (iii) a good correlation between temperature determined by chlorite geothermometry and organic matter reflectance exists; and (iv) the duration and depth of burial as well as pore fluid chemistry are important factors affecting clay mineral formation.

**Mots-Clés:** clay minerals, Kübler, Index, diagenesis and very low, grade metamorphism, chlorite geothermometry, faults, East Coast Basin, New Zealand

Intervenant

## Geodynamic history and hydrocarbon migration system of the Hikurangi subduction wedge (North Island, New Zealand)

Pierre Malie <sup>\*1</sup>, Julien Bailleul <sup>2</sup>, Frank Chanier <sup>3</sup>, Sébastien Potel <sup>2</sup>, Geoffroy Mahieux <sup>2</sup>, Tatiana Maison <sup>2</sup>, Rafael Ferreiro Mählmann <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géosciences Université de Montpellier CC.60 Place E.Bataillon. 34095 Montpellier. Cedex 5 – Ministère de l’Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique – France

<sup>2</sup> UniLaSalle, UPJV, EA 7511 Basins-Reservoirs-Resources (B2R), F-60026 Beauvais, France – Institut Polytechnique UniLasalle – France

<sup>3</sup> Laboratoire d’Océanologie et de Géosciences (LOG) – Université Lille I - Sciences et technologies, CNRS : UMR8187, Université du Littoral Côte d’Opale – University of Lille, 59650 Villeneuve d’Ascq cedex, France, France

<sup>4</sup> University of Darmstadt – Technische Universität Darmstadt, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Darmstadt, Germany, Allemagne

The eastern margin of the North Island of New Zealand has undergone several deformation episodes mainly related to subduction processes. The onland exposures of Neogene trench slope basins together with their Jurassic to late Paleogene pre-subduction series permit to provide a high-resolution sampling of the whole section of the accretionary wedge. A multi-proxy approach was performed to determine organic matter (OM) maturity (organic petrography, Rock-Eval pyrolysis, vitrinite reflectance (VR) and solid bitumen reflectance (BR) (R<sub>r</sub>: random reflectance), compared with clay mineral reaction progress (Kübler-Index (KI) and clay mineral paragenesis). The combination of clay mineral indices and OM reflectances, (specifically VR versus BR) enables the recognition of heat flow changes during sedimentary and tectonic burial. Determining solid bitumen maturity and thus hydrocarbon migration, allows a better understanding of the thermal evolution and fluid migration system. VR and Rock-Eval pyrolysis results show a homogeneous maturity pattern in the thick Neogene sedimentary cover. These measurements indicate a very low geothermal gradient through the Early Miocene to Late Miocene within the Hikurangi prism. An increase of the Illite/smectite interstratifications content in the Miocene strata but also in the Late Cretaceous, and even in the deepest structural levels, are consistent with the low burial temperature gradient evidenced by Rock-Eval and VR results. The thermal history preserved in the Late Cretaceous rocks implies that this subduction wedge was very stable until the Late Miocene. At the beginning of subduction beneath North Island, at about c. 25 Ma, burial increase dramatically and a hydrocarbon system started together with hydrocarbon migrations.

**Mots-Clés:** New Zealand, organic matter analysis, clay minerals, thermal history

<sup>\*</sup>Intervenant

## IODP drilling at the north Hikurangi margin, New Zealand, Expedition 372 and 375

Pierre Malie <sup>\*1</sup>, Sylvain Bourlange <sup>2</sup>, Morgane Brunet <sup>3</sup>, Expedition 372 And 375

<sup>1</sup> Laboratoire Géosciences Université de Montpellier CC.60 Place E.Bataillon. 34095 Montpellier. Cedex 5 – Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique – France

<sup>2</sup> GéoRessources - Ecole Nationale Supérieure de Géologie (ENSG) – Université de Lorraine – Rue du Doyen Marcel Roubault 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France

<sup>3</sup> Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) – CNRS : UMR7154 – France

In the north Hikurangi margin, New Zealand (east of Gisborne), well-characterised SSEs occur every 1-2 years, over periods of 2-3 weeks at depths of <2 -15 km below the seafloor. Two International Ocean Discovery Program (IODP) expeditions 372 and 375, in Nov-Dec 2017 and March-May 2018, drilled for the first time the Hikurangi margin to target slow slip events. Both expeditions provide valuable data regarding the lithology of material being subducted. Preliminary findings will be discussed in this presentation regarding the lithostratigraphy, physical properties and geochemistry.

**Mots-Clés:** New Zealand, Hikurangi prism, slow slip event, organic geochemistry

<sup>\*</sup>Intervenant

## Succession de dépôts de " turbidite/homogénite " comme témoins potentiels de grands séismes et tsunamis dans l'arc des Petites Antilles

Chloé Seibert <sup>\*ψ1</sup>, Nathalie Feuillet <sup>1</sup>, Christian Beck <sup>2</sup>, Pierre Morena <sup>3</sup>, Gueorgui Ratzov <sup>4</sup>,  
Eva Moreno <sup>5</sup>, Antonio Cattaneo <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) – UMR7154– France

<sup>2</sup> Institut des sciences de la Terre (ISTerre) – Université de Savoie, CNRS : UMR5275 –Le Bourget du Lac, France

<sup>3</sup> Unité de recherche Géosciences Marines (Ifremer) (GM) – France

<sup>4</sup> Géoazur (GEOAZUR) – Université de Nice Sophia-Antipolis – France

<sup>5</sup> Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) -- 57, rue Cuvier - 75231 Paris Cedex 05, France

L'arc des Petites Antilles résulte de la subduction des plaques nord et sud-américaines sous la plaque caraïbe, avec un taux de convergence de 2cm/an. Le catalogue sismique de cette zone ne commence qu'à partir du 17ème siècle, et seuls deux grands séismes dévastateurs ont été rapportés, en 1839 (Mw 8) et 1843 (Mw 8,5) respectivement au large de la Martinique et en Guadeloupe. Cependant, la magnitude estimée de ces séismes est inférieure à celle de certains séismes d'autres zones de subduction, tels que les séismes de Sumatra (Mw 9,3, 2004) et de Tohoku (Mw 9,0, 2011). La détection de possibles séismes de subduction et leur répartition dans le temps reste un défi dans l'arc des Petites Antilles.

Cette étude est basée sur l'identification et la caractérisation de turbidites co-sismiques en utilisant une approche intégrant des données géophysiques et des archives sédimentaires marines. Cette analyse se concentre sur les bassins du domaine avant-arc et du prisme d'accrétion au large de la Guadeloupe. La première partie de l'étude consiste à contraindre les sources sédimentaires à partir des données de bathymétrie, d'imagerie et de profils CHIRP. Nous avons mis en évidence deux sources de sédiment pour les bassins avant-arc ainsi que différents mécanismes de transport : 1) les îles et bancs carbonatés drainés par des systèmes de canyons développés sur des pentes raides et affectés par des failles ; et 2) le prisme d'accrétion affecté par de nombreux glissements. La deuxième partie est basée sur l'étude de carottes sédimentaires sur lesquelles plusieurs mesures ont été réalisées : 1) géophysiques (densité, susceptibilité magnétique, rX, colorimétrie) ; 2) géochimiques à travers des rapports XRF ; et 3) un échantillonnage de micro-granulométrie. Des datations radiocarbone ont été réalisées afin de contraindre temporellement les événements gravitaires.

Plusieurs dépôts turbiditiques sont présents dans les carottes ainsi que des dépôts exceptionnels nommés complexe " homogénite/turbidite ". Ces derniers peuvent atteindre des épaisseurs de plus de 4m. Les séismes récents de 1839 et 1843 n'ont pour l'instant pas été identifiés dans l'enregistrement sédimentaire. Cependant, certains écoulements gravitaires majeurs sont corrélés d'une carotte à l'autre sur plus de 150 km. L'étendue de la zone de corrélation suggère que ces événements ont été engendrés par des méga-séismes peut être accompagnés de tsunami. Le plus récent a été daté à 4400 cal BP.

**Mots-Clés:** Paléosismologie, Homogénites, Séismes de subduction, Petites Antilles, Environnement marin profond

## Geometry and kinematics of viscous wedges or viscous-rich, in fold-and-thrust belts and accretionary prisms in the presence of salt: an analogue experimental approach.

Bruno Vendeville <sup>\*1</sup>, Dan Qiu <sup>2</sup>, Fabien Graveleau <sup>1</sup>, César Witt <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - CNRS : UMR8187, Université des Sciences et Technologies de Lille - Université du Littoral Côte d'Opale - France

<sup>2</sup> Tongji University, 303 Haiyang No.7 Road, 201306, Shanghai - Chine

The critical taper theory is generally accepted by the scientific community for brittle wedges (e.g., critical, overcritical, or undercritical tapers). Much less is known about wedges that comprise large volumes of viscous than brittle material. This is not the case in regular accretionary prisms, but it does exist in some areas (in the central Mediterranean, for example), where such cases occurred. We conducted a systematic set of experiments, in which the salt analogues where large, viscous layers involved in a convergent setting underlying or overlying a brittle overburden, such as occurred in the Mediterranean after the Messinian Salinity Crisis. Their presence had an impact that is not so well known to people dealing with the general geodynamics of the region. We used the "pull-from-below" technique, in which a tilted basal conveyer belt simulated the subducting plate. We tested the cases where the entire wedge was viscous: results indicate that convergence was entirely accommodated by internal salt flow, with frontal shortening and an incredible amount of very localized extension in the proximal area, near the backstop, while the regional slope remained horizontal. Using the same set up, but adding some brittle overburden led to results that are partly similar and different: in the overburden, there was some frontal contraction, but no proximal extension. But internal flow (a combination of Poiseuille and Couette flow) kept the surface slope horizontal.

We also applied our research to the specific case of the Mediterranean ridge, where the structure of the accretionary prism (i.e., made of brittle sediments) was well established before the Messinian Salinity Crisis occurred. Then, the area was "flooded by mobile, Messinian evaporites. There, our experimental results show that had have a major impact on the geometry and kinematics of the sub-Messinian salt layer. During that particular experiment, the sub-salt thrusts stopped propagating forward, and, instead, were reactivated in order to thicken the hinterland, while keeping the overall surface slope (sub-salt + salt) at a near zero slope angle.

**Mots-Clés:** accretionary prism, messinian evaporites

\*Intervenant

## An U-Pb zircon chronology based correlation for forearc sediments through the Ecuadorian - Peruvian border

César Witt <sup>\*ψ1</sup>, Jean-Yves Reynaud <sup>1</sup>, Carlos Aizprua <sup>1</sup>, Marc Poujol <sup>2</sup>, Chloé Amberg <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, F 59000 Lille, France (LOG) – CNRS : UMR8187 – France

<sup>2</sup> Géosciences Rennes (GR) – Université de Rennes 1, Centre National de la Recherche Scientifique – France

<sup>3</sup> Strata Solutions – Consultant indépendant – France

The forearc area of SW Ecuador and NW Peru offers high-quality outcrops of sedimentary rocks of Paleocene to Late Miocene age. This section of the South American margin is highly segmented and is constructed through different geodynamic processes north and south of the border area, the most important of those being related to the accretion of oceanic terrains during the Late Cretaceous. Historically, the few sedimentary correlations through the Ecuador - Peru border have been exclusively based on time constraints, fully derived from micropaleontology analysis. A new preliminary correlation is proposed and based on U-Pb (LA ICP MS) dating of more than 3000 zircon grains coming from: 1) the Santa Elena Peninsula, an ancient outer wedge related to the accretion of SW Ecuador against the continental margin; 2) The Eocene Talara basin, and 3) the Oligocene-Miocene Progreso and Zorritos basins. Besides few cases in which the zircon record is related to recycling processes, most of younger age clusters provide the age of sedimentation or an age that is very close to it. The new isotopic ages have, in few cases redefined the former paleontological ages, but in most cases, they have sharpened the time interval proposed for sedimentation in function of paleontological records.

Our main preliminary results show that the deformed Paleocene series in Ecuador (60-56 Ma; Azúcar Fm.) has no relative counterparts in North Peru where oldest forearc sediments are dated between 54 and 51 Ma (Salinas Fm.). Other differences and similarities are noted. Eocene sediments outcropping in the Santa Elena Peninsula in Ecuador (Ancón Gp.) were deposited between ~52 Ma to ~41 Ma after main activity leading to the formation of the outer accretionary wedge in a turbiditic slope fan setting. The Peninsula uplifts at 32-30 Ma coeval with the sedimentation of the Zapotal Fm., bringing about shallow marine, tide-dominated settings with minor coastal carbonates in the middle-late Miocene units of the Progreso basin. In Peru, the Eocene Talara Fm. exhibits westward (?) prograding shelf deltas, and the depositional setting might remain shallow (at least locally) until the formation of a major, subaerial unconformity related to the formation of the Gulf of Guayaquil during the Early Miocene. The Zorritos Fm. deposited above indicate a fluvial to coastal setting.

More zircon ages are required on the Peruvian side to refine the picture of infilling basins, in order to relate their boundaries to the activity of the major sliver-bounding faults of the margin.

**Mots-Clés:** forearc, Ecuador, Peru

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: cesar.witt@univ-lille.fr



### 3. PALEONTOLOGIE



## **3.1 Biodiversity, ecosystems and climate change: a prospective from the past / La paléontologie : de la macroévolution à la macroécologie**

## From Ediacaran to Devonian - The Great Early-Middle Palaeozoic Biodiversification

Alain Blieck \*ψ 1

1 UMR 8198 Evo-Eco-Paléo – CNRS, Univ. Lille – France

Geobiological developments of end-Proterozoic-Phanerozoic life on Earth are traditionally described &/ interpreted as a series of rises, 'plateaus', falls, crises, (r)evolutions... A reappraisal of the Ediacaran (ca. 635 to 540 Ma BP) to Mid-Palaeozoic (ca. 440-360 Ma BP) part of this story is proposed. Most recent data &/ re-analyses of palaeobiologic databases as, e.g., the Paleobiology Database, show that (1) life on Earth suffered of hundreds of common 'small', 'medium' & 'long crises all along its duration [what has been known for long], (2) ordinary, 'normal destiny' of all individuals, species, ecosystems is death [*idem*], (3) the 'Cambrian Explosion' [ca. 540-520 Ma BP] began in the Ediacaran, (4) it was continued with the GOBE (Great Ordovician Biodiversification Event, ca. 490-440 Ma BP), (5) the latter did peak in Early Devonian time or GEBE (Great Eodevonian Biodiversification Event; ca. 415-400 Ma BP), (6) this is part of a Palaeozoic Plateau that ended with the Permian/Triassic crisis at ca. 255-250 Ma BP, (7) the latter did correspond to a 'two shot' crisis, (8) the Early Triassic (ca. 250-245 Ma BP), post-crisis recovery did not exist because palaeontologists find more & more evidence of 'normal' life during this time slice, (9) this was followed by a near-continuous Meso-Cenozoic (245 to 0 Ma BP), logarithmic-like, rise (or MCR) until the Present, (10) the Mesozoic/Cenozoic, a.k.a., the K/T boundary & crisis (at ca. 65 Ma BP) was not that important &, in any case, just an 'ordinary' event, with the now classical case of dinosaurs survived by birds, (11) latter MCR is still going on, (12) there is no rationality in thinking that this will soon end, & (13) the so-called '6th Extinction' which would be operating nowadays, is a 'pure figment of the imagination'. I thus propose to replace the now traditional biodiversity curve for the Ediacaran to Devonian by a 'Half-Horst' one as an analogic model that needs (i) not being thrown away, (ii) being complemented with additional data, & (iii) being statistically re-analysed with a new open mind. This programme needs multi-disciplinary collaborations in order to reach a multi-factor numerical model that, in turn, will be included within a new palaeobiological model for Earth Life inside a renovated theory of biological evolution such as the 'Phylo-Evo-Devo-Eco-Geo-Bio' one being in progress. In turn, all this is part of a world wide web of collaborations, initiated in order to write the *Handbook of Palaeichthyology*, vol. IA, "Agnatha" I, H.-P. Schultze ed., Dr Friedrich Pfeil Verlag, München, FRG.

**Mots-Clés:** Evolution, Palaeozoic, Vertebrates, Crises, Recoveries

\*Intervenant

ψAuteur correspondant: alain.blieck@yahoo.fr

## Updating apparent patterns of Silurian-Devonian plant species diversity

Borja Cascales-Miñana <sup>\*ψ1</sup>, Elliott Capel <sup>1</sup>, Philippe Gerrienne <sup>2</sup>, Thomas Servais <sup>1</sup>, Chris J. Cleal <sup>3</sup>

<sup>1</sup> UMR 8198 Evo-Eco-Paléo – CNRS, Univ. Lille – France

<sup>2</sup> Palaeobiogeology-Palaeobotany-Palaeopalynology Univ. of Liege, Palaeobiogeology-Palaeobotany-Palaeopalynology, B-4000 Liege – Belgique

<sup>3</sup> National Museum Cardiff. Cathays Park, Cardiff CF10 3NP – Royaume-Uni

It is widely believed that the temporal trajectory of Phanerozoic plant species diversity follows a sustained increase during the Devonian. Recent plant genus-level palaeodiversity curves call into question such an assumption, and suggest that more than one diversity dynamic could be involved in the apparent changes of global Devonian plant richness. Here, we present new species-level dynamics of Silurian-Devonian plant diversity. This study is based on a new, recently compiled large-scale comprehensive plant species macrofossil dataset. A battery of data analyses at both genus- and species-level have been carried out. Major plant clades (i.e., lycophytes and euphylllophytes) have been also independently analyzed. Different metrics including total and standard diversity measures have been used. Results confirm that the Silurian-Devonian plant species dynamics follow a sequence of diversity peaks, observed in the Pragian, Givetian and the uppermost Devonian. Palaeodiversity data analyses carried out on zosterophylls, lycopsids and euphylllophytes, explain a part of this view. For instance, evidence clearly shows a zosterophyll-based Early Devonian (Pragian) "explosion" on land ecosystems. From this, we discuss whether global dynamics were reflecting changes in the floras as a whole, or were linked to separate diversification patterns within individual clades. Results show no evidence of a mass extinction in terrestrial vegetation at the Frasnian-Famennian boundary.

**Mots-Clés:** Early land plants, factor analysis, land ecosystems, plant evolution, time series.

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: borja.cascales-minana@univ-lille.fr

## Les thylacocéphales (Euarthropoda, Thylacocephala) du Crétacé supérieur du Liban

Sylvain Charbonnier <sup>\*1</sup>, Denis Audo <sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Centre de Recherche sur la Paléobiodiversité et les Paléoenviro-nements (CR2P) – Muséum National d’Histoire Naturelle (MNHN), CNRS : UMR7207, Sorbonne Universités, UPMC – France

<sup>2</sup> Yunnan Key Laboratory for Palaeobiology, Yunnan Univ., China – Chine

<sup>3</sup> MEC International Joint Laboratory for Palaeobiology and Palaeoenvironment, Yunnan Univ., China – Chine

Les thylacocéphales (Euarthropoda, Thylacocephala) sont des euarthropodes caractérisés par leur carapace " bivalve " et leurs trois appendices préhensiles antérieurs. Leur mode de vie et leur histoire évolutive sont encore loin d'être bien connus. La présente étude documente de nouveaux thylacocéphales issus des Konservat-Lagerstätten du Crétacé supérieur du Liban qui ont livré les représentants les plus récents du groupe. Trois nouveaux genres et espèces sont décrits dans les calcaires sublithographiques cénomaniens de Hakel et de Hadjoula, et deux nouveaux genres et une nouvelle espèce sont décrits dans les calcaires crayeux santoniens de Sahel Alma. Parmi les spécimens de Hakel et de Hadjoula, *Paradollocaris vannieri*, *Thylacocaris schrami* et *Globulocaris garassinoi* sont les premières mentions de thylacocéphales dans le Cénomanien du Liban. *Paradollocaris* et *Thylacocaris* sont assignés aux Dollocarididae sur la base de leurs larges encoches optiques limitées par des processus rostraux et antéro-ventraux, de leurs yeux hypertrophiés, et de leurs encoches postérieures avec des épines dorsales et ventrales. De plus, *Thylacocaris* présente un caractère très singulier : une encoche optique avec deux grosses épines optiques protégeant l'œil. *Globulocaris* est assigné aux Protozoïdidae sur la base de sa petite carapace avec une très nette encoche dorsale à l'avant de l'épine postéro-dorsale. Parmi les spécimens de Sahel Alma, *Keelicaris deborae* est une nouvelle forme de thylacocéphales dans le Santonien du Liban. Possédant une très inhabituelle carapace en forme de quille de navire avec des côtes et des ponctuations, il est assigné aux Microcarididae. Le nouveau genre *Hamaticaris*, présentant un rostre crochu très particulier, est aussi érigé pour *Protozoea damesi* Roger, 1946. Ces deux espèces s'ajoutent aux thylacocéphales bien connus de Sahel Alma : *Pseuderichtus cretaceus* Dames, 1886, *Protozoea hilgendorfi* Dames, 1886 et *Thylacocephalus cymolopos* Lange, Hof, Schram & Steeman, 2001. La présence d'une faune aussi variée de thylacocéphales augmente la diversité du groupe durant le Crétacé supérieur. La diversité et l'abondance des thylacocéphales de Sahel Alma posent aussi le problème des causes de leur disparition du registre fossile après le Santonien.

**Mots-Clés:** Thylacocephala, arthropodes, Cénomanien, Santonian, Hakel, Hadjoula, Sahel Alma, Liban, Konservat, Lagerstätten

<sup>\*</sup>Intervenant

## Ostracodes (Crustacea) et événements de la limite Permien – Trias: extinctions et récupération

Sylvie Crasquin \*<sup>1</sup>, Marie-Béatrice Forel <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre de recherche sur la Paléobiodiversité et les Paléoenvironnements (CR2P) – Univ. Pierre et Marie Curie - Paris 6, CNRS : UMR7207, Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) – France

Au cours de ces dernières années, les coupes les plus représentatives de la limite Permien-Trias en milieu marin ont été échantillonnées pour l'étude des ostracodes (Crustacea). Nous avons travaillé, entre autres, le GSSP de Meishan en Chine du Sud, la coupe de Bulla dans les Dolomies italiennes, la coupe du Cürük dağ dans le Taurus en Turquie, une coupe dans les Montagnes du Bükk en Hongrie et une coupe dans l'Elbourz en Iran, dans le but d'évaluer les taux d'extinction et de récupération chez ce groupe.

Les taux d'extinction spécifique sont de 98 à 100% dans la majorité des coupes sauf en Hongrie. Les taux d'extinction générique sont faibles de 30 à 39%.

Après l'événement d'extinction en masse qui se produit toujours avant la limite Permien – Trias, la biodiversité des ostracodes est strictement contrôlée par l'environnement. Nous avons pu distinguer différentes phases pour la récupération post-crise des ostracodes :

- Une phase de survie (Griesbachien) avec des faunes mixtes paléozoïques et méso- cénozoïques
- Un maximum de pauvreté (Dienérien – Smithien), avec une diversité et une abondance très faibles
- Une phase de récupération – dispersion (Spathien) qui marque le début de la récupération
- Une phase de radiation à l'Anisien

Le niveau de biodiversité des ostracodes du Permien moyen ne sera pas atteint avant le Ladinien.

**Mots-Clés:** Ostracodes, extinction, récupération, Permien, Trias

\*Intervenant

## Patterns of radiolarian diversity changes in the context of the Great Ordovician diversification

Taniel Danelian <sup>\*1</sup>, Claude Monnet <sup>1</sup>

<sup>1</sup> UMR 8198 Evo-Eco-Paléo – CNRS, Univ. Lille – France

The pattern of changes in radiolarian biodiversity is explored with quantitative methods based on the study of an exhaustive database of mid-Cambrian to Silurian radiolarian occurrences. Our objective is to find out trends in taxonomic richness, and to test possible biases that may have influenced these patterns. Data were selected from the literature from only those studies that provide independent chronostratigraphic calibrations; for most analyzed radiolarian assemblages the age resolution is at the stage level. As abundance data are rarely available or not consistent among radiolarian studies, the analyzed dataset only contains incidence data (i.e. presence/absence). Species described under open nomenclature (e.g. "sp. A") or with uncertainty (e.g. "cf.") were accounted for. Taxonomic assignments of species were revised with respect to the original publication and species names were harmonized in order to eliminate possible taxonomic biases. Changes in radiolarian diversity dynamics were estimated with different methods, including bin-based, boundary-based, time-based and resampling indices. The Cambrian-Ordovician and Silurian intervals appear as two contrasted periods. The Cambrian-Ordovician is characterized by short-lived taxa with two diversity peaks in the Tremadocian and the Darriwilian that may reflect sampling bias and/or chronostratigraphic bias. Few are the radiolarian data for the Dapingian stage and none exists so far for the Hirnantian. The Silurian is characterized by long-lived taxa with two robust high diversity values in the Telychian and the Gorstian. Thus, the major result highlighted by the various biodiversity indices is a clear, important and protracted Silurian diversification peaking in the Telychian and following the Hirnantian glaciation. Overall, a bias of focus cannot be discarded, as well as a geographic bias (most records belong to North America). Subsampling of the database with estimates of the taxonomic richness underlines the importance of the Tremadocian pic and suggests that the Aeronian-Telychian and Gorstian pics are not exceptionally high. The biodiversity curves produced in this study reflect the current knowledge of Lower Palaeozoic radiolarians and highlight the need for additional taxonomic and biostratigraphic studies to evaluate these biodiversity patterns.

**Mots-Clés:** radiolaria, Ordovician diversification, paleobiodiversity dynamics

\*Intervenant

## Les affinités phylogénétiques des érymides (Crustacea, Decapoda) basées sur des caractères morphologiques et ses implications systématiques

Julien Devillez <sup>\*1</sup>, Sylvain Charbonnier <sup>1</sup>, Véronique Barriel <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre de recherche sur la Paléobiodiversité et les Paléoenvironnements (CR2P) – Museum National d’Histoire Naturelle, CNRS : UMR7207, Sorbonne Univ., UPMC, France

Les Erymidae Van Straelen, 1925 sont des homards typiques du Mésozoïque, représentant environ 5% des espèces de décapodes fossiles. Malgré leur importance dans le registre fossile, leurs affinités phylogénétiques demeurent incertaines. Si l'idée classique consiste à intégrer les érymides dans les Astacidea avec les homards munis de pinces, de récents travaux suggèrent de fortes affinités avec les glypheées (homards dépourvus de pinces) au sein des Glypheidea. De plus, selon les auteurs, certains taxa ont parfois été considérés comme des érymides ou non. De récentes contributions ont cependant restreint les érymides aux genres munis d'une plaque intercalaire. La présence de cette plaque, située au-dessus de la région céphalique, est considérée comme unique parmi les décapodes. Elle a été reportée sur l'actuel *Enoplometopus* A. Milne-Edwards, 1862, supportant l'inclusion de ce genre aux côtés des érymides au sein du clade Erymida et à remettre en question le statut éteint des érymides. S'appuyant autant que possible sur les récents travaux de révision sur les érymides et les glypheées, les objectifs de notre analyse phylogénétique sont : 1) de clarifier les affinités phylogénétiques des érymides, 2) de délimiter le groupe, et 3) d'explorer les relations internes du groupe. L'analyse cladistique nous a conduit à considérer 6 genres d'érymides : *Eryma* Meyer, 1840, *Enoploclytia* M'Coy, 1849, *Palaeastacus* Bell, 1850, *Pustulina* Quenstedt, 1857, *Stenodactylina* Beurlen, 1928, et *Tethysastacus* Devillez *et al.*, 2016. Ils sont inclus dans le clade Erymoidea, groupe-frère du clade regroupant les autres homards pourvus de pinces. Ceci supporte l'inclusion des érymides au sein des Astacidea. *Enoplometopus* demeure externe aux Erymoidea. La présence de la plaque intercalaire chez ce genre est donc probablement le résultat d'une convergence avec les Erymoidea, qui n'ont donc pas de représentants actuels. La prise en compte de la zone post-orbitaire, récemment décrite, dans les données morphologiques supporte la distinction de 2 clades au sein des Erymoidea. Ces clades constituent 2 familles : les Enoploclytidae n. fam., n'ayant pas de zone post-orbitaire (*Enoploclytia*, *Pustulina*), et les Erymidae, avec la zone post-orbitaire. Les Erymidae sont aussi divisés en 2 sous-familles : la simplicité des sillons de la carapace de *Tethysastacus* justifie l'instauration des Tethysastacinae s.-fam., tandis qu'*Eryma*, *Palaeastacus* et *Stenodactylina* sont assignés aux Eryminae.

**Mots-Clés:** Crustacés, Homards, Mésozoïque, Phylogénie

\*Intervenant

## Diagnosis of metapodials of Pleistocene bears using 3D analysis: news insights for the study of disparity and phylogeny of arctoid and spelaean lineages.

Johann Galdies <sup>\*</sup>, Patrick Auguste <sup>ψ</sup>, Claude Monnet <sup>φ1</sup>

<sup>1</sup> UMR 8198 Evo-Eco-Paléo – CNRS, Univ. Lille – France

Middle and Upper Pleistocene European bears are generally well represented in faunal accumulations, especially for the typical cave bear *Ursus spelaeus*. During this time interval, the bears are characterized by two major groups: the arctoid (the extinct and extant brown bear *U. arctos*) and the spelaeon groups (the archaic cave bear *U. deningeri* and the different specific forms of evolved cave bears like *U. spelaeus*). The phylogeny of these lineages is not yet clear, as well as their origin and speciation. Two major debates pervade the community of cave bear researchers: 1) the identification of the specific separation between *U. deningeri* and *U. spelaeus*; 2) the diet and ecoethology of these animals (omnivorous *versus* hyperherbivorous). In addition, the spelaeon lineage is marked by the evolution of successive different forms and their potential role as biostratigraphic markers remains to be solved. To answer these questions, previous investigation focused on teeth, skull and mandibular bones. In this study, we considered the morphology of metapodials as an alternative, as well as the application of 3D digital methods. Metacarpals and metatarsals belonging to *U. spelaeus*, *U. arctos* and *U. deningeri*, were scanned in 3D, next a template of landmarks characteristic of mammal metapodials has been designed, and then assigned onto the surface of the virtual bones to perform a geometric morphometric analysis. After generalized Procrustes superimposition, principal component analysis and discriminant analysis were performed to investigate morphological trends and discrimination between the different bear groups. Linear measurements were also taken and analyzed in parallel, so as to compare and contrast the results of these two methods. Linear and 3D geometric data revealed the arctoid and spelaeon lineages to occupy different positions in morphospace, with *U. deningeri* close to *U. spelaeus*. While metacarpal linear biometry may serve as a practical tool to distinguish different species of Ursidae, the metatarsals show less clear discrimination. The 3D approach supports the previous results and shows that the proximal end is more variable than the distal end of the metapodials. Confusion matrices of discriminant analyses are generally more accurate with 3D data. *U. deningeri* was shown for the first time by 3D analysis to occupy a distinct morphospace from that of *U. spelaeus*. In conclusion, these results show: 1) the efficiency of both linear and 3D geometric analysis on metapodia of Pleistocene bears to separate the different forms; 2) the opportunities to use them as biochronostratigraphic tools; 3) a potential link between ecoethological adaptations inside the evolution of the cave bear lineage (predation *versus* burrowing using the modification of shape of the metacarpals).

**Mots-Clés:** Ursidae, Pleistocene, North, West Europe, Metapodia, Geometric Morphometrics

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: patrick.auguste@univ-lille1.fr

<sup>φ1</sup>Auteur correspondant: claude.monnet@univ-lille1.fr

## The record of a major storm event during the Middle Lutetian: the "Campanile giganteum" horizon preserved in Fleury-la-Rivière (Paris basin)

Valentine Scaut <sup>1</sup>, Xavier Devleeschouwer <sup>\*2</sup>

<sup>1</sup> Ryzuk Geotechnical – Canada

<sup>2</sup> Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique (IRSNB) – Belgique

The section of "Fleury-la-Rivière" is located to the East of the Paris basin in the Champagne area. The studied section is the well famous underground galleries of the "Cave aux Coquillages" related to an old wine cave of the Legrand-Latour champagne.

A 5 cm sampling resolution interval along a 10 m thick sequence is the results of high resolution field campaign divided in seven different sub-sections in the underground galleries.

The first 2.30 m of the section are represented by azoic cuisian grey to dark sands towards the top. Above these azoic sands, a lens composed of 20-40 cm thick brown clays was observed. Strong lateral variations are present with glauconite-rich cuisian sands containing here and there plant debris and molluscs fragments. The limit between the cuisian and the lutetian sands is marked by an erosive surface corresponding to the transgressive surface of the Middle Lutetian transgression. The lutetian bioclastic sands constitute the remaining 7.70 m of the section. A bioclastic horizon, essentially composed of bivalve and gastropod shells, contains the giant *Campanile giganteum* fossils. This horizon is present at 6.5 m from the base of the Middle Lutetian sequence and form a 40 cm thick level. Above this bed, 50 cm purple bioclastic sands highlight an accumulation of the *Sigmesalia* gastropods. Above his level, the section becomes less fossiliferous. The "Campanile giganteum" horizon contains many individuals giant gastropods that are globally easily visible inside the underground galleries. To determine if there is a meaning in the orientation in plan view of these fossils, a rose diagram has been produced from the azimuth measurements of 136 shells in plan view. The results indicate a major unimodal direction with an average 130.2 N corresponding to 45 % of all the shells. The rose diagram strongly suggests that the deposition of the *Campanile giganteum* fossils acquired a dominant direction resulting from a current. The wave action cannot be the process at the origin of the shells accumulation. It means that the deposition site corresponds to a para-autochthonous diverse fauna composed of molluscs but containing also echinoids, sponges, algae, ostracods, and foraminifers that were transported by a strong and energetic current and deposited not far from their living environment. The *Campanile giganteum* horizon represents a storm deposits and the only one preserved in that part of the sea during the Middle Lutetian.

**Mots-Clés:** Middle Lutetian, Campanile giganteum, storm deposits

\*Intervenant

## La colonisation des océans par le nannoplancton calcaire

Baptiste Suchéras-Marx <sup>\*ψ1</sup>, Emanuela Mattioli <sup>φ2</sup>, Pascal Allemand <sup>2</sup>, Fabienne Giraud <sup>3</sup>,  
Bernard Pittet <sup>2</sup>, Julien Plancq <sup>4</sup>, Gilles Escarguel <sup>5</sup>

1 CEREGE – Aix Marseille Université : UM34, UM34, CNRS, IRD, INRA, Coll France – Europôle Méditerranéen de l’Arbois - Aix-en-Provence - France

2 Laboratoire de Géologie de Lyon - Terre, Planètes, Environnement – ENS de Lyon, CNRS, UMR 5276, Fr

3 Univ. de Grenoble-Alpes (ISTerre) – Université Grenoble Alpes - France

4 University of Glasgow – University of Glasgow - France

5 Laboratoire d’Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés (LEHNA) – CNRS : UMR5023, Univ. Claude Bernard - Lyon I (UCBL) – Villeurbanne Cedex, France

L’émergence du nannoplancton calcaire au Mésozoïque a profondément modifié la dynamique du cycle des carbonates et du cycle du carbone océanique. Cependant, cette colonisation reste mal contrainte dans le temps, reposant sur des observations parfois contradictoires entre évolution spécifique et abondance de nannofossiles calcaires dans le registre fossiles. Dans cette étude, nous décrivons la colonisation des océans par les nannofossiles calcaires en incorporant l’évolution de la richesse spécifique, la taille moyenne et le taux d’accumulation des nannofossiles calcaires depuis le Jurassique inférieur jusqu’au Quaternaire. La quantification des taux d’accumulation des nannofossiles calcaires repose sur une base de données bibliographique d’environ 3900 échantillons provenant de coupes en Europe occidentale, et de forages océaniques répartis partout dans le monde. Nos résultats mettent en évidence l’existence de 4 périodes distinctes dans la dynamique macroévolutionnaire du nannoplancton calcaire. La première phase, appelée phase d’Invasion, commence au Jurassique inférieur et se termine au Crétacé inférieur. Elle est caractérisée par une augmentation de la richesse spécifique et des taux d’accumulation du nannoplancton calcaire avec des tailles moyennes des coccolithes augmentant très légèrement. Durant cette phase, nos reconstructions paléogéographiques de la production nannoplanctonique montrent un passage de la production depuis les environnements épicontinentaux vers l’océan ouvert. Vient ensuite, une seconde phase macroévolutionnaire correspondant à l’ensemble du Crétacé et appelée phase de Spécialisation. Elle est marquée par des taux d’accumulation stables malgré une augmentation de la richesse spécifique et de la taille moyenne du nannoplancton calcaire. Lors de la crise d’extinction massive K/Pg, le nannoplancton calcaire est très fortement impacté, laissant supposer que durant le Paléocène, de nouvelles et brèves phases d’Invasion puis de Spécialisation ont lieu. Enfin, à partir de l’Eocène jusque dans l’Actuel, une 4ème phase, nommée phase de Domination, implique des taux d’accumulation toujours stables, mais une dominance toujours plus marquée d’espèces de plus en plus petites et de moins en moins diversifiées. Ces 4 phases macroévolutionnaires sont mises en perspective de possibles forçages biotiques et abiotiques au travers des modèles de la Reine Rouge et du Fou du Roi.

**Mots-Clés:** Nannoplancton calcaire, macroévolution, Mésozoïque, Cénozoïque, colonisation

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: [sucheras@cerege.fr](mailto:sucheras@cerege.fr)

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: [emanuela.mattioli@univ-lyon1.fr](mailto:emanuela.mattioli@univ-lyon1.fr)



## Ponte en eaux troubles : stratégies reproductives chez les crustacés Polychelida du Jurassique de La Voulte-sur-Rhône

Clement Jauvion <sup>\*ψ1,2</sup>, Denis Audo <sup>3,4</sup>, Sylvain Bernard <sup>2</sup>, Sylvain Charbonnier <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre de recherche sur la Paléobiodiversité et les Paléoenvironnements (CR2P) – Museum National d'Histoire Naturelle, CNRS : UMR7207, Sorbonne Univ. UPMC Paris VI - France

<sup>2</sup> Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie (IMPMC) – IRD, UR206, CNRS : UMR7590, Museum National d'Histoire Naturelle, Sorbonne Univ. UPMC Paris VI - Paris, France

<sup>3</sup> Yunnan Key Laboratory for Palaeobiology, Yunnan Univ. – Chine

<sup>4</sup> MEC International Joint Laboratory for Palaeobiology and Palaeoenvironment, Yunnan Univ. – Chine

Les Polychelida sont des crustacés décapodes ayant été d'abord découverts à l'état de fossiles, à l'image du coelacanthe. Les espèces actuelles vivent en milieu profond et sont peu diversifiées, ce qui contraste avec la diversité fossile du groupe. Les Polychelida sont assez abondants dans le Konservat-Lagerstätte de La Voulte-sur-Rhône (Callovien, Jurassique). Ce site fossilifère est unique par son environnement relativement profond et son activité hydrothermale.

Les fossiles exceptionnellement bien préservés de La Voulte incluent deux spécimens appartenant à deux espèces distinctes de femelles de Polychelida, que nous avons étudiés en tomographie par rayons X. Les données révèlent leur anatomie externe et interne exceptionnellement bien préservée. Les structures découvertes les plus marquantes sont des ovaires matures pour l'un et des centaines d'œufs préservés sous le pléon (abdomen) pour l'autre. Ces découvertes attestent, pour la première fois dans le registre fossile, du cycle reproducteur de crustacés *Eucarida pleocyemata* Burkenroad, 1963, dont l'autapomorphie est la maturation des œufs fécondés sous le pléon.

Les informations directes concernant la paléobiologie et l'histoire évolutive des stratégies reproductives chez les crustacés fossiles demeurent extrêmement rares. Elles proviennent presque exclusivement de Konservat-Lagerstätten. L'étude complète des fossiles provenant de ces sites ainsi que des processus de fossilisation (biais taphonomiques) est centrale pour la compréhension des formes de vie passées et de leurs interactions.

**Mots-Clés:** Crustacés, Reproduction, Konservat, Lagerstätten, Jurassique, Oeufs

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: clement.jauvion@mnhn.fr

## Quantifying the paleogeographic driver of Cretaceous carbonate platforms development using paleoecological niche modeling

Alexandre Pohl <sup>\*1</sup>, Marie Laugie <sup>2</sup>, Jean Borgomanero <sup>1</sup>, Julien Michel <sup>1</sup>, Cyprien Lanteaume <sup>1</sup>, Christopher Scotese <sup>3</sup>, Camille Frau <sup>4</sup>, Emmanuelle Poli <sup>5</sup>, Jean-Pierre Masse <sup>1</sup>, Yannick Donnadieu <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE) - CNRS : UMR7330, IRD, Aix-Marseille Univ., Collège de France, INRA, Aix-en-Provence - France.

<sup>2</sup> euro engineering - Hélioparc Pau Pyrénées 2 avenue Prés Pierre Angot, 64000 PAU, France

<sup>3</sup> Northwestern Univ.- Department of Earth Planetary Sciences, Evanston, IL 60208 Evanston, USA

<sup>4</sup> Groupement d'Intérêt Paléontologique - Science et Exposition, 60 bd Georges Richard, Toulon, France, France

<sup>5</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) - 64018 Pau, France

Platform carbonates are a major component of the Earth System but their spatial extent through geological time is difficult to reconstruct, due to the incompleteness of the geological record, sampling heterogeneity and their intrinsic complexity. Coupled ecological niche modeling and deep-time general circulation models have been used to predict the occurrence of platform carbonates at the global scale during the Cretaceous.

Niche modeling uses the fuzzy logic to predict probable occurrence of platform carbonates as a function of sea-surface temperature, sea-surface salinity, primary productivity and water depth. The first three parameters derive from Cretaceous global paleoclimatic simulations using a coupled ocean-atmosphere general circulation model, while bathymetry is based on paleogeographical reconstructions. Model predictions were validated with the well-documented and abundant geological data from the Aptian. The methodologies developed for the Aptian were subsequently extended to other Cretaceous time intervals.

The results of the niche model accurately predict the geographic distribution of Aptian carbonate platforms if a preference for low marine productivity levels is assumed for the rudist-dominated carbonate factories. However, if a preference for high productivity levels is assumed, the modeling results do not match the reported global distribution of Aptian carbonate platforms. From the Early Cretaceous into the Late Cretaceous sea level rose and the continents, on average, moved into lower latitudes. The model predicts a corresponding increase in the extent of the carbonate platforms, mainly due to the increasing extent of shallow-water environments available to carbonate development. The results of the simulations indicate that long-term sea-level rise may have been a major factor responsible for the increase in the area of platform carbonates during the Cretaceous.

**Mots-Clés:** AHP, Cretaceous climate, fuzzy logic, general circulation model, niche model, platform carbonates

<sup>\*</sup>Intervenant

## Silurian vertebrates from northern Mongolia: diversity, ecology and environment

Zivile Zigaite-Moro <sup>\*1</sup>, Valentina Karatajute-Talimaa , Michael M. Joachimski , Teressa Jeffries

<sup>1</sup> Université d'Uppsala – Suède

The present day territory of northwestern Mongolia was a part of Siberian palaeocontinent, an independent landmass, which persisted during the whole Palaeozoic era as the only large palaeoterrane in the Northern Hemisphere. Early Silurian (Llandovery) vertebrates from the northwestern Mongolia are known for their diversity and a great number of endemic taxa, and represent the earliest known Silurian vertebrate ecosystem of the Siberian palaeobiogeographical province. The foreshore and lagoonal facies rich in vertebrate microremains comprise acanthodians, chondrichthyans, galeaspids, heterostracans, mongolepids, tesakoviaspids, thelodonts, and possible eriptrychiids. In this work we present new data on palaeobiodiversity and palaeoenvironment, including oxygen isotope and REE data, in attempt to reconstruct this ancient ecosystem and conditions favouring diverse vertebrate fauna in relatively high northern palaeolatitudes.

**Mots-Clés:** vertebrate micro remains, thelodonts, acanthodians, galeaspids, Silurian, Mongolia

<sup>\*</sup>Intervenant



## **3.2 Micropaleontology in Earth sciences: implications in biostratigraphy, paleoceanography, paleoclimate and evolution**

## Coccolith distributional patterns in surface sediments of the Eastern Mediterranean Sea

Odysseas Archontikis <sup>\*ψ1</sup>, Margarita Dimiza <sup>2</sup>, Elisa Malinverno <sup>3</sup>, Alexandra Gogou <sup>4</sup>,  
Maria Triantaphyllou <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Département Sciences de la Terre, FST, Université de Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq, Lille, France

<sup>2</sup> Faculty of Geology Geoenvironment, National and Kapodistrian University of Athens, Panepistimioupolis 15784, Athens, Greece - Greece

<sup>3</sup> Department of Earth and Environmental Sciences, University of Milano-Bicocca, Milano, Italy - Italie

<sup>4</sup> Hellenic Centre for Marine Research, Institute of Oceanography, 190 13 Anavyssos, Attiki, Greece - Greece

The Mediterranean Sea has long been considered a hot spot for climate change and carbonate system to understand ocean biogeochemistry. Coccolithophores are single-celled photosynthesizing phytoplankton and one of the primary marine calcifiers on Earth, playing a key role in the global carbon cycle. They significantly contribute to the uptake of atmospheric carbon via photosynthesis, to the export of organic and inorganic carbon from the sea surface to the ocean interior and ultimately, by precipitating their coccoliths on the ocean's seafloor, to the formation of deep-sea sediments.

Quantitative analysis of 100 surface sediments has been carried out to investigate coccolith distribution along the oligotrophic Eastern Mediterranean Sea. Coccolith abundance (LM countings / coccoliths x g-1) and biogeographic distributional patterns were used to defining variation in the total coccolith composition. *Emiliania huxleyi* is prevailing in the coccolith top-sediment assemblages, occupying the c. 65% in the North Aegean and Marmara Seas and 53% in the Levantine basin. The most frequently observed species *Rhabdosphaera* spp. and *Syracospaera pulchra* are present in low percentages ( $\leq 16\%$ ), showing a slightly increasing tendency towards the east. The coastal polluted environment of Saronikos Gulf presents high concentrations of *Helicosphaera carteri*; *Gephyrocapsa oceanica* is highly increased in the Thermaikos Gulf, whereas remarkable drops of *Florisphaera profunda* are recorded in the shallower central Aegean plateau. SEM techniques and biometric measurements of *E. huxleyi* coccoliths (1582 in total) indicated variability in the coccolith calcification degree. Specimens bearing low coccolith relative tube width values dominate in the Marmara (approx. 0.1), and the deep North Aegean Seas ( $\leq 0.30$ ). Moderately calcified species with higher relative tube width values (0.30-0.40) are recorded in the north Cretan, south Cretan margin, and Levantine sediments, possibly reflecting both the overcalcified populations of the Levantine waters during the cold season and secondary calcite precipitation effects. Overgrown forms are documented mainly in the ultra-oligotrophic South Aegean and Cretan Seas, most probably with respect to stronger diagenetic influence. Apparently, potential genetic variability coupled with variations in the physicochemical and carbonate system parameters of the different basins and also processes at the water-sediment interface and seabed affect the original *E. huxleyi* coccolith calcification, resulting to the highly calcified forms of the Eastern Mediterranean sediments.

**Mots-Clés:** coccoliths, distribution, surface sediments, eastern Mediterranean, *Emiliania huxleyi*, calcification

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: odysseas.archontikis@etudiant.univ-lille1.fr

## Lower Jurassic climatic trends of a south-Tethyan margin

Hicham Baghli <sup>\*ψ1,2</sup>, Emanuela Mattioli <sup>1,3</sup>, Jorge E. Spangenberg <sup>4</sup>, Mustapha Bensalah <sup>2</sup>,  
Florent Arnaud-Godet <sup>1</sup>, Bernard Pittet <sup>1</sup>, Guillaume Suan <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Géologie de Lyon - Terre, Planètes, Environnement (LGL-TPE) –Univ. Claude Bernard Lyon 1, ENS de Lyon, CNRS, UMR 5276 – France

<sup>2</sup> Laboratoire de recherche n25, Département des Sciences de la Terre, Univ. de Tlemcen – Algérie

<sup>3</sup> Institut Universitaire de France (IUF) – MENESR, – France

<sup>4</sup> Institut des dynamiques de la surface terrestre (IDYST) – IDYST, Lausanne Univ. - Suisse

The Lower Jurassic is distinguished by extreme environmental variations, related to carbon cycle disturbances and temperature instabilities. The climate is defined as globally warm, interrupted by periods of severe cooling. The aim of this study is to have a better understanding of these environmental perturbations in the southernmost margin of Tethys and to better define the latitudinal gradient which remains a controversial subject.

Our study area is located in Northwestern Algeria and was characterized during the lower Jurassic by arid conditions. Such conditions are inferred on the basis of widespread distribution of carbonate platforms and of Sebkha type continental environments. Our new results on calcareous nannofossils are also compatible with an arid climate. These show some differences with respect to North-west Europe, and reveal a latitudinal environment control on nannoplankton species distribution and assemblage composition, which was likely related to different nutrient concentrations in oceanic waters. Our results show a low concentration of calcareous nannofossils in Algerian rocks likely resulting from oligotrophic conditions, which is consistent with the overall arid climate in these southern latitudes. We also notice a pronounced provincialism, with high relative abundances of *Mithrolitus jansae* which is considered as a South-Tethyan taxon.

Nannofossil assemblages are compared to high-resolution carbon and oxygen stable isotopes and to elemental analyses, measured on well preserved calcite of brachiopod shells. The diagenetic alteration of brachiopod calcite has been monitored in various ways, inter alia, under thin section in SEM, and manganese and iron concentration of their calcite.

Our results show several isotopic excursions in both O and C stable isotopes that document the Sinemurian-Pliensbachian Event, the Late Pliensbachian, the Pliensbachian-Toarcian Event, and the T-OAE. We provide thus information on the climatic evolution of the uppermost Sinemurian to the middle Toarcian (~12MA) and make comparisons between stable isotopes and calcareous nannofossil data.

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: hicham.baghli@univ-lyon1.fr

**Mots-Clés:** paleoclimate, carbon and oxygen isotopes, nannofossils, Early Jurassic, Algeria

## Paleobiodiversity and taphonomy - The P-T boundary and Radiolaria: a crisis or an artefact.

Martial Caridroit \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UMR 8198 Evo-Eco-Paléo – CNRS, Univ. Lille – France

The biggest extinction in the history of Earth took place during the latest Permian, followed by a low diversity during the Early Triassic. An impressive diversification took place during the Middle Triassic. This sequence of events is an often adopted scheme to describe the radiolarian response during the P-T boundary perturbations.

In order to better understand the radiolarian biotic response during this peculiar time period, 3 sections were studied; they are situated in SW Japan, S China and N Thailand:

A continuous distal radiolarite sequence, crossing the P-T boundary in **Japan**. Here, the Upper Permian is characterised by a facies change and radiolarian skeletons are not obtained or are poorly preserved around the supposed P-T limit.

In South **China**, a continuous proximal series showing the surprising presence of "Triassic forms" in the last beds of the Upper Permian. This presence of "Lazarus taxa" or "refugia taxa" shows that the supposed "mass extinction" needs to be further investigated.

In Northern **Thailand**, recent works permit to describe another distal radiolarite sequence crossing the P-T boundary. It is similar to the Japanese ones but there is not a facies change and the last Permian assemblages are quite different from those from Japan and South China.

From these first results, several questions naturally arise.

-1- Are we comparing same age assemblages or are the differences between assemblages related to radiolarian provincialism around the P-T boundary?

-2- Does the observed low diversity around the P-T boundary and during the lowest Triassic correspond to a true disaster, long-term refugia or a change in the conditions of fossilisation?

In order to address the above questions, several approaches were applied on the 3 sequences mentioned above.

Count of radiolarian skeletons on thin section preparations: abundance, productivity.

Evaluation of the different levels of preservation (based on the aspect of extracted skeletons).

Physical analysis (magnetic susceptibility) to refine the correlations

Geochemical analyses (whole rock geochemistry, major and trace elements).

Comparisons of taxonomic studies between the Late Paleozoic and the Triassic times: the taxonomic discriminations are very different.

As a first conclusion, we can suggest that the P-T crisis has been exaggerated.

To go further beyond, a study was conducted to compare the chemistry and the preservation step in layers with very well preserved radiolarians and layers where radiolarians are poorly preserved or not preserved. For that, a series of non-metamorphic radiolarian cherts was studied (Jurassic, Greece).

The result shows that there is no correlation between the rock geochemistry and the state of radiolarian preservation. It may be, that differential preservation reflects the characteristics of the quartz crystals forming the radiolarian skeleton. Additional studies are under way.

**Mots-Clés:** Radiolaria, taphonomy, P-T boundary, mass extinction

## Paleogeographic Evolution of a Peat Deposit in the Southern Brazilian Continental Shelf based on Palynofacies Analysis

Iran Carlos Stalliviere Corrêa <sup>\*ψ1</sup>, Jair Weschenfelder <sup>1</sup>, Cristiane Bahi Santos-Fischer <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Brésil

This paper presents the study of peat located on the southern Brazilian continental shelf (32°30'S and 51°15'W), from a core, collected at 60 m below the current sea level, deposited at around 12,540-12,150 cal years BP ( $10,460 \pm 40$  14C year BP, with a carbon isotopic ratio (13C/12C) of -17.3 ‰ PDB). The sedimentary sequence, from the bottom to the top, is composed of silt-clay-sand, followed by a layer of carbonaceous material, which is covered by clay-silt sediments with very fine sand, characteristic of marsh environment defined as wetlands frequently inundated. High percentages of components of the phytoclast group are recorded, which are related to the short transport of the particles by rivers and proximal depositional conditions. Palynological Organic Matter (POM) was divided into opaque and translucent fitoclasts. The assemblage is dominated by the translucent group (69 %), followed by the Amorphous Organic Matter (AOM) with 21 % of the components and the opaque group (1%). The palynomorph group is represented by sporomorphs of terrestrial origin, organic microplankton, fungi, and palynoforaminifera, which represented 9 % of the total sum. This group is classified as abundant and it is represented by Chenopodiaceae (35 %), Poaceae (16 %), *Botryococcus* sp. (16 %), Zygnematophyceae (12 %), Fungi (8 %), followed by uncommon Araucariaceae (5 %) and rare groups of Palynoforaminifera (4 %), Dinophyta (2.2 %) and Myrtaceae (1.6 %), indicating that its occurrence is controlled by AOM and phytoclast dilution. The presence of Fungi indicates a humid transitional environment. Relative abundances of *Botryococcus* sp. and Zygnematophyceae algae indicated the continental (freshwater) contribution at the expense of low abundances of marine palynomorph group. The relatively high percentages of POM and AOM recorded here indicated the proximity of terrestrial sources from the ancient shoreline. Our results indicated that the region was a part of a wide coastal plain or a broad transitional environment, related to the presence of a complex sedimentary system, including beaches, lagoons, wetlands, deltaic systems and barrier islands developed during lower sea levels than today. The advance of the sea, during the transgression, changed the region leaving away only the ancient deposits from previous coastal landscapes, allowing the deposition of peat sediments as relics or impressions of ancient vegetation that covered the area. The presence of peat layer recovered at a depth of 60 m below the current level can be associated with a long-term period of the sea level stabilization during the Late Pleistocene/Holocene, in relation to its level, forming the peat layer, which is also associated with climate changes.

**Mots-Clés:** peat, palynology, paleogeography, continental form

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: [iran.correa@ufrgs.br](mailto:iran.correa@ufrgs.br)

## Biostratigraphical precision of the Oligo- Miocene Series of Cap Negro, Northern Tunisia

Somrani Chaima \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculté des sciences mathématiques physiques et naturelles de Tunis (FST) – Tunisie

A multidisciplinary approach based on micropaleontology, biostratigraphy and facies sedimentology has been applied to the study of the Oligocene- lower Miocene series of the Cap Negro cross sections in northern Tunisia in order to establish a biostratigraphic and chronostratigraphic division of the numidian flysh in the Mogods chain.

This study was carried out on samples from the predominantly marly series of Sidi Mechreg section and flyshoid one of Cap Negro. In this area deposits have proved to be very rich in foraminifers and ostracods.

Based on the abundance and stratigraphic distribution of planktonic foraminifer's species in the different lithological units, we have been unable to establish a fine biozonation in this area and compared with the general scheme of the Cenozoic chart. Seven planktonic zones are recognized: five zones in Oligocene and two in Lower Miocene (Aquitanian).

Micropaleontological analysis shows the occurrence of about 200 species of microfossils in these formations (benthic, planktonic foraminifers and ostracods). In Cap Negro section, only agglutinated foraminifer's assemblages are recognized. Analysis of agglutinated foraminifera revealed a unique and diverse Oligocene -Miocene fauna that is described for the first time in Tunisia. The benthic foraminifers of Sidi Mechreg show an upper bathyal depositional environment, with a paleobathymetry included between 200- 500 m. While Cap Negro section was deposited at middle to lower bathyal and probably abyssal paleodepths.

**Mots-Clés:** Eocene, Oligocene, Miocene, Cap Negro, Sidi Mechreg, Tunisia

## New methods and preliminary results on the distribution of benthic Foraminifera in Gullmar Fjord (Sweden): comparison between oxic and hypoxic stations

Constance Choquel <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Planétologie Géodynamique, équipe Bio-Indicateurs Actuels et Fossiles (LPG-BIAF) - Université d'Angers - France

The Gullmar Fjord on the Swedish west coast is well known for its seasonal hypoxic conditions in its deep waters. As benthic Foraminifera are known to be excellent bioindicators as they respond quickly to physico-chemical changes, we hope to characterise the impacts of a depleted oxygen habitat on Foraminiferal assemblages and distributions. Therefore to improve the paleoreconstruction of low O<sub>2</sub> events in the past, it is fundamental to understand the Foraminiferal ecology... we choose to invest this topic regarding the interactions between geochemistry and Foraminifera at different spatial scales. The general objective of this first part of my Ph.D. thesis is to compare oxic and hypoxic ([O<sub>2</sub>] < 2 ml.l<sup>-1</sup>) stations, by analyzing the assemblages of living (Cell Tracker Green-labelled) benthic Foraminifera and the geochemical conditions, dissolved (2D gels) and solid (FLEC-Fluorescently Labelled Embedded Cores) sediments in which they live. The densities of Foraminifera are standardized by 10 cm<sup>3</sup> with the fraction > 100 µm. The results indicate the presence of tolerant species to oxygen depleted environment as *Bulimina marginata*, *Bolivina pseudopunctata*, *Cassidulina laevigata* and denitrifying species as *Nonionella* sp. Dead fauna is analysing to document a potential temporal change of faunal diversity. This ecological study with picking of CTG-labelled Foraminifera is coupled with a combination of innovative high-resolution approaches such as the use of 2D gel and the FLEC. The 2D gel enable to obtain a high spatial resolution images with colorimetric measurements to have access to the micro heterogeneity of the sediment. This millimetric resolution allows obtaining a map of the interstitial waters concentrations of the chemical elements such as manganese (Mn<sup>2+</sup>), nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) and ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) of a slice of sediment. This same slice of sediment used for the 2D gel is embedded in resin according to the FLEC method, permitting to observe in 2D 1) the physical structure of the sediment (granulometry, bioturbation ...), 2) the geochemistry of solid elements (quantification of the pool of chemical elements such as manganese and iron oxides) 3) the position of living Foraminifera (CTG) thus allowing characterization of their micro-habitats. Our study demonstrates how important it is to work at low resolution scale on micro-habitats.

**Mots-Clés:** Foraminifera, micro-habitats, geochemistry, hypoxia

<sup>\*</sup>Intervenant

## The Ediacaran-Cambrian rise of siliceous sponges: new engineers of the marine Si cycle and the development of oceanic ecosystems

Sébastien Clausen <sup>\*1</sup>, Shan Chang <sup>ψ2</sup>, Qinglai Feng <sup>2</sup>

1 UMR 8198 Evo-Eco-Paléo – CNRS, Univ. Lille – France

2 School of Earth Sciences, State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China  
Univ. of Geosciences, Wuhan – Chine

Porifera are among the earliest-branching metazoan taxa. Molecular estimates date their origin during the Cryogenian. However, most tentative reports of Precambrian sponges have been questioned or denied. It has been hypothesized that the paucity of Precambrian spicules may reflect an evolutionary pattern, as silica biomineratization by sponges may have not evolved or may have remained weak; or on the other hand, an ecological trend, as spiculate sponge may have stayed ecologically restricted until the early Cambrian. As one of the earliest major ecosystem engineers, sponges undoubtedly contributed to the formation of the typical Phanerozoic, oxygenated, well-mixed, clear oceanic water column. However, modelling their ecological feed-back and engineering effects on related ecosystems during Ediacaran-Cambrian interval remains by itself somehow speculative. This interval records a shift in the marine silica cycle, a biogeochemical transition difficult to elucidate. In today's oceans, dissolved Si concentrations are largely biologically controlled, while during the Ediacaran-Cambrian interval, hydrothermal activities provided abundant silica fluids resulting in cherts of hydrothermal origin especially in deep water successions. Abundant sponge spicules are reported herein from four Ediacaran-Cambrian sections of the Yangtze Gorges, South China. Through a combination of paleontological and geochemical data, we provide the first evidence of Ediacaran sponge spicules, with surprisingly high abundance, even forming spiculites. These results support molecular paleobiology estimate of Precambrian metazoan siliceous biomineralizers, and the monaxon diactines and (or) sponging fibres being an ancestral character of skeletonized sponges. Furthermore, geochemical analysis on sponge bearing cherts from the Yanjiahe Formation shows they are mostly biogenic in origin. Punctual hydrothermal signature suggests hydrothermal input might have provided Si and nutrients favoring the blooming of sponges. Along with the rise of sponges in the late Ediacaran, a biological takeover of oceanic dissolved Si co-occurred, resulting in the widespread deposition of biogenic chert. They might have increased the burial of organic carbon, the ventilation of seawater, as well as the structural complexity of habitats and biodiversity of metazoans. Such engineering effects might have contributed to the first establishment of modern-type ocean ecosystems during the Cambrian explosion.

**Mots-Clés:** sponges, Cambrian explosion, Si cycle

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: changshancug@163.com

## The geodynamic and palaeoenvironmental significance of the micropaleontological record in the Lesser Caucasus (Armenia, Karabagh)

Taniel Danelian <sup>\*1</sup>, Gayané Asatryan <sup>2</sup>, Araiyk Grigoryan <sup>2</sup>, Lilit Sahakyan <sup>2</sup>, Ghazar Galoyan <sup>2</sup>,  
Monique Seyler <sup>3</sup>, César Witt <sup>3</sup>, Ara Avagyan <sup>2</sup>, Marc Sosson <sup>4</sup>

<sup>1</sup> UMR 8198 Evo-Eco-Paléo - CNRS, Univ. Lille - France

<sup>2</sup> Institute of Geological Sciences, National Academy of Sciences of Armenia - Armenia

<sup>3</sup> UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, CNRS, Univ. Lille, ULCO. - France

<sup>4</sup> CNRS, UMR Géoazur, France - Univ. Nice-Sophia Antipolis, - France

Radiolarian cherts preserved in the Lesser Caucasus are often associated with submarine lavas that are considered to be part of the Amasia-Sevan-Hakari (ASH) ophiolitic zone, an eastwards prolongation of the Izmir-Ankara-Erzincan suture zone. Chert sequences observed in this region are either the sedimentary cover of ophiolitic lavas or intercalated in them. Radiolarian biochronology, combined with petrographic observations and geochemical analyses of ophiolitic lavas, helps us to improve our understanding of the geodynamic and paleoenvironmental evolution of this geologically complex region.

A synthesis of all available biochronological and radiometric data from the Lesser Caucasus establishes that oceanic floor spreading was taking place during the Middle/Late Triassic between the South Armenian-Tauride-Anatolide plate and Eurasia.

Based on our own investigations along the Old Sotk pass locality, radiolarian-rich cherts and siliceous claystones occur as large blocks preserved in a mélange, together with basic igneous lithologies and carbonate blocks with Triassic conodonts. Recent results point to the presence of Bajocian radiolarian cherts and Albian siliceous claystones, which contain evidence of fine volcaniclastic input from subaerial volcanic activity. Based on all the radiolarian ages obtained on siliceous tuffs found in the sedimentary cover of the ASH ophiolitic zone (Amasia, Sarinar, Old Sotk pass) there is now good evidence that subaerial volcanic island arc activity was underway for most of the Middle Jurassic to Lower Cretaceous (Bajocian/Bathonian to Albian).

Dated radiolarian cherts represent radiolarian ooze that accumulated more or less continuously during the Bajocian to Cenomanian time interval, in a pelagic environment of the Tethys realm that was starved of any terrigenous or carbonate input. Bajocian cherts are now discovered throughout the Lesser Caucasus (Vedi, Sevan and Hakari ophiolites); on the contrary, Cenomanian cherts are known for the moment only from Amasia (NW Armenia). They appear to be deposited just before the beginning of obduction of the Vedi ophiolite on the South Armenian Block.

**Mots-Clés:** radiolaria, biochronology, Lesser Caucasus, Armenia, Karabakh, Tethys, geodynamics

\*Intervenant

## Biostratigraphy of the last 50 kyr in the Contourite Depositional System of the Gulf of Cadiz

Emmanuelle Ducassou \*<sup>1</sup>, Rim Hassan <sup>1</sup>, Eliane Gonthier <sup>1</sup>, Josette Duprat <sup>1</sup>, Vincent Hanquiez <sup>1</sup>,  
Thierry Mulder <sup>1</sup>

<sup>1</sup> UMR 5805 Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (EPOC) – Université Sciences et Technologies - Bordeaux I – France

Contourite depositional systems are very common along many continental margins and in deep basins worldwide. They can reach huge lateral and vertical dimensions and have a high stratigraphic, sedimentological, paleoceanographic and paleoclimatological significance.

This study proposes a biostratigraphic framework for the last 50 kyr in the contourite depositional system of the Gulf of Cádiz with a solid and independent age control, and tests the reliability of faunal-based analyses in a bottom current-dominated environment related to high current velocities. The distribution of planktonic foraminifera and pteropods has been studied in twenty-two piston cores of the Holocene and Late Pleistocene age from the Gulf of Cádiz. A detailed correlation between the cores has been made possible by a large radiocarbon and isotopic data set and a high degree of similarity of frequency changes within several species by coiling direction changes of *Globorotalia truncatulinoides* and *Globorotalia hirsuta* and by occurrences of the polar species *Neogloquadrina pachyderma* and *Limacina retroversa*.

Occurrences of these polar species are clearly related to paleoclimatic oscillations and reflect the last six changes in surface water conditions in the Gulf of Cádiz over the last 50 ka (Heinrich Stadials and Younger Dryas).

The *Globorotalia hirsuta* coiling change could be a good indicator for locating the Pleistocene-Holocene boundary in the region but the very low abundances of this species at this boundary make it difficult to apply.

*Globorotalia truncatulinoides* sinistral events may reflect MOW migration and especially with five periods with its shallowest vertical location over the last 50 ka (Holocene and MIS3).

These surface-to-subsurface biostratigraphical markers have been observed regardless of sedimentation rates and sedimentary environments (contouritic drifts vs slope without bottom current influence). They are thus fully suitable to regional comparisons between areas under and outside of high-velocity bottom currents. They could be especially suited to compare the spatial behaviour of the different branches of the MOW with a high resolution.

**Mots-Clés:** Biostratigraphy, Foraminifera, Holocene, Younger Dryas, Heinrich stadials, Mediter- ranean Outflow, Gulf of Cadiz

\*Intervenant

## The Bay of Biscay: a key area for testing transfer functions derived from planktonic microfossils

Frédérique Eynaud <sup>\*1</sup>, Mélanie Wary <sup>2</sup>, Aurélie Penaud <sup>3</sup>, Meryem Mojtahid <sup>4</sup>, Yannick Mary <sup>1</sup>

<sup>1</sup> UMR 5805 Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (EPOC) - Univ. Sciences et Technologies - Bordeaux I - France

<sup>2</sup> Institute of Environmental Sciences and Technologies, Autonomous University of Barcelona (ICTA) - Espagne  
<sup>3</sup> Domaines Océaniques - Univ. 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

<sup>4</sup> UMR-CNRS 6112 LPG-BIAF Bio-Indicateurs Actuels et Fossiles - Univ. Angers - UFR Sciences 2 Bd. Lavoisier 49045 ANGERS Cedex, France

The Bay of Biscay is a semi-enclosed basin of the North-East Atlantic Ocean, bounded by French coasts to the east and Spanish ones to the south. This triangular portion of the Western Europe margin extends from Galician Finisterre Cape at 44° N to Goban Spur at 50° N. Its modern hydrography is complex and depicts marked seasonal patterns, mainly related to the dynamics of North Atlantic proximal gyres (subpolar gyre -SPG- and subtropical gyre- STG). Modal climatic forcings such as the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) or the North Atlantic Oscillation (NAO) are well expressed in the modern hydrographical conditions. The depth of the thermocline is highly variable on a seasonal and annual scale: it varies from 20 to 50 m in summer, while the winter mixed layer reaches about 200 m, with some maxima up to 450 m under strong winds. Surface hydrographical patterns therefore strongly constrain the distribution of planktonic microorganism populations at various time scales in the bay. For more than twenty years, many efforts have been made to document its hydroclimatic evolution during recent climatic cycles. The Bay of Biscay provides indeed exceptional sedimentological archives which will be at the center of this work. Through a few key examples covering at least the last 350 thousand years, we will document the links between population dynamics of planktonic microfossils and the (paleo) hydrography of this area. A particular focus will be placed on the sub-millennial to decadal scales, where the long-term changes in the Atlantic meridional circulation (AMOC) are expressed.

**Mots-Clés:** Paleoceanography, planktonic microfossils, late Quaternary

<sup>\*</sup>Intervenant

## Pronounced northward shift of the westerlies during MIS 17 leading to the strong 100,000-year ice cycles

Maria Fernanda Sanchez Goni <sup>\*1,2</sup>, Patrizia Ferretti <sup>3</sup>, Josue M. Polanco-Martinez <sup>4</sup>, Teresa Rodrigues <sup>5,6</sup>, Montserrat Alonso-Garcia <sup>5,6</sup>, Francisco-Javier Rodriguez-Tovar <sup>7</sup>, Javier Dorador <sup>7</sup>, Stéphanie Desprat <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (EPOC) – CNRS : UMR5805, École Pratique des Hautes Études [EPHE], Univ. Sciences et Technologies - Bordeaux I - France

<sup>2</sup> École pratique des hautes études (EPHE, PSL) – CNRS : UMR5805 – France

<sup>3</sup> Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) – Italie

<sup>4</sup> Basque Center for Climate Change (BC3) – Espagne

<sup>5</sup> Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) – Portugal

<sup>6</sup> Universidade do Algarve – Portugal

<sup>7</sup> Royal Holloway Univ. of London – Royaume-Uni

The Marine Isotope Stage (MIS) 17 interglacial, ~715 - 675 thousand years before present (ka), marks the end of the Mid-Pleistocene Transition as intensified, long and asymmetrical 100-kyr ice age cycles became eminently established. Increasing arrival of moisture to the Northern Hemisphere high latitudes, resulting from the northwestward migration of the Subpolar Front and the intensification of the Norwegian Greenland Seas (NGS) convection, has been put forward to explain the emergence of this quasi-periodic 100-kyr cycle. However, testing this hypothesis is problematic with the available North Atlantic precipitation data. Here we present new pollen-based quantitative seasonal climate reconstructions from the southwestern Iberian margin that track changes in the position and intensity of the westerlies. Our data compared to changes in North Atlantic deep and surface water conditions show that MIS 17 interglacial was marked by three major shifts in the westerlies tightly linked to oceanographic changes. In particular, we report here for the first time a drastic two-steps northward shift of the westerlies centered at ~ 693 ka that ended up with the sustained precipitation over southern Europe. This finding points to the substantial arrival of moisture to the Northern Hemisphere high latitudes at the time of the decrease in summer energy and insolation contributing to the establishment of strong 100-kyr cycles.

**Mots-Clés:** Mid, Pleistocene Transition, Westerlies, 100 kyr ice age cycles, southwestern Europe, vegetation, precipitation, temperature

Intervenant

## The rise of Meso-Cenozoic ostracods (Crustacea): progress in a "geometrically variable" knowledge

Marie-Béatrice Forel <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> Centre de Recherche sur la Paléobiodiversité et les Paléoenvironnements (CR2P) – Museum National d'Histoire Naturelle, Univ. Pierre et Marie Curie - Paris 6, CNRS : UMR7207 – France

Ostracods are micro-crustaceans characterized by a calcified bivalve carapace, which provides them with a good fossil record since the beginning of the Ordovician. In marine environments, these organisms have been severely affected by the end-Permian extinction, about 252 Ma, and it is considered that this crisis prompted a deep restructuring of their assemblages: the transition from the Palaeozoic Fauna, dominated by Palaeocopida, to the Meso-Cenozoic or Modern Fauna, massively dominated by Cytheroidea until the present day. However, this shift becomes really observable only at the very end of the Late Triassic and mainly in the Jurassic, so that Triassic marine assemblages are no longer really Palaeozoic, without being truly Modern yet. The Triassic period therefore appears as a pivotal interval in the understanding of this event that reconstructed all marine ecosystems in the long term. During the Early Triassic, marine ostracods are mainly surviving taxa. The Middle and late Triassic taxa have mainly been studied in the 1970's and 1980's and most of our knowledge on these assemblages, as well as on the Jurassic ones, is issued from European localities: it is thus common to consider that the radiative evolution of Modern ostracods took place in western Tethys. However, new data challenge this paradigm. An assemblage from the Carnian of Turkey recently provided the oldest evidence of drilling predation on an ostracod: this observation not only confirms the purely Mesozoic aspect of this ecosystem, but also the establishment of predation by juveniles' predators as early as the Carnian. Another assemblage from the Carnian of South China illustrates the oldest occurrences of the genus *Carinobairdia*, typical of the Norian-Rhaetian interval of the western-Tethys, and of the Schulerideidae family, characteristic of Jurassic *lato sensu* European waters. These observations are the very first tangible evidence of the hypothesis proposed in the 1980's that the eastern portion of the Tethys might have played a major role in the radiation of Modern ostracods during the Triassic, which might have colonized the western Tethys owing to the Late Triassic transgression.

**Mots-Clés:** Ostracods, Triassic, Carnian, Turkey, China

## Primary versus carbonate production in the Toarcian, a case study from the Mochras borehole (Wales)

Emanuela Mattioli <sup>\*1,2</sup>, Alessandro Menini <sup>3</sup>, Guillaume Suan <sup>3</sup>

1 Laboratoire de Géologie de Lyon - Terre, Planètes, Environnement (LGL-TPE) - Univ. Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, ENS de Lyon, CNRS, UMR 5276 - France

2 Institut Universitaire de France (IUF) - MENESR - France

3 LGL-TPE - Université de Lyon, UCBL, ENSL, CNRS, - France

The classical scenario for interpreting the lower Toarcian anoxic event (T-OAE; ~183 Ma) and the associated negative carbon isotope event is commonly related to the massive release of  $^{12}\text{C}$  to the surface reservoirs, because of the emplacement of Karoo-Ferrar LIP (1), the destabilization of methane hydrates from continental margins (2), or the thermogenic methane release due to sill emplacement in Karoo-Ferrar (3). Whatever the cause, this massive carbon release is thought to have favored greenhouse conditions, enhanced hydrological cycle and continental weathering (4). These conditions finally promoted the delivery of nutrients to shallow basins, supporting the primary productivity and, because of O<sub>2</sub> consumption by organic matter respiration, the development of oceanic anoxia (5).

However, several works showed that primary producers, like calcareous nannoplankton and dinoflagellates, experienced a severe crisis during the T-OAE, culminating with a phytoplankton blackout (e.g., 6; 7). Also, organic matter fluxes seem to be not exceptional (8). The analysis of nannofossil size in the Mochras borehole (drilled by the BGS) can help us to solve this conundrum. The sedimentary recovery of the core is excellent, the section is continuous and well-dated and has been the object of high-resolution analyses (e.g., 9), that makes it an ideal spot where to analyze the combined evolution of carbonate and primary production. Through combination of biometry and absolute abundances (specimens per g of rock) we can estimate the fluxes of nannofossil-derived carbonates and organic matter to the sediments. We can compare these results to the total organic content of sediments and to the d<sub>13</sub>CTOC, which reflects the perturbations of the carbon cycle occurred in the lower Toarcian. This study should enable us to better assess the mechanisms of mineral and organic carbon export from the upper ocean to the sediments during the major climate and environmental changes that occurred in the Toarcian.

- Duncan, R.A. et al., 1997. *J. Geophys. Res.* 102, 18127–18138 Hesselbo, S.P. et al., 2000. *Nature* 406, 392–395  
\*Svensen, H. et al., 2007. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 256, 554–566 Brazier, J.M. et al., 2015. *Earth Planet. Sci. Lett.* 411, 164–176  
Jenkyns, H.C. 1988. *Am. J. Sci.* 288, 101–151  
Bucefalo-Palliani, R. et al., 2002. *Marine Micropal.* 46, 223–245 Mattioli, E. et al., 2004. *Journal Geol. Soc. London* 161, 685–693  
Suan, G. et al., 2015. *Paleoceanography*, 30, doi:10.1002/2014PA002758 Xu, W. et al., 2018. *Earth Planet. Sci. Lett.* 484, 396–411

**Mots-Clés:** Paleoceanography, paleoclimatology, paleoenvironments

## The paleogeographic significance of Jurassic and Devonian radiolarian assemblages recovered from the Karaburun Peninsula (western Turkey)

Merve Mentes Iscen <sup>\*ψ1</sup>, Taniel Danelian <sup>2</sup>, Martial Caridroit <sup>2</sup>, Sylvie Regnier <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Istanbul Univ. Cerrahpasa, Department of Geological Engineering - Turquie

<sup>2</sup> UMR 8198 Evo-Eco-Paléo - CNRS, Univ. Lille - France

The sedimentary sequences of the Karaburun peninsula belong to the Bornova Flysch zone. The paleogeographic affinity of the latter is still in debate; for some it is more related to the Menderes Massif, for others to the Sakarya Zone. Radiolarian assemblages are important to understand the paleogeographic history of the Bornova Flysh Zone. Although many studies exist about Mesozoic carbonate platform sequences cropping out on the Karaburun Peninsula, Meso- zoic and Upper Paleozoic radiolarian cherts, resent in the area, remain largely unexplored. In this study, relatively well preserved radiolarian assemblages were recovered from three outcrops displaying sequences of radioalria cherts: the Kalecik, Ildir and Karareis sections.

The Kalecik section is situated in the northern part of the Karaburun Peninsula, near the Kalecik town; it displays a ca. 15 m-thick block of red bedded cherts and it is regarded as being part of the Bornova mélange (*sensu Erdogan*). It yielded a radiolarian assemblage characterized by *Hexasaturnalis minor* (BAUMGARTNER), *Transhsuum brevicostatum* gr. (OZVOLDOVA) and *Tritrabs* sp.cf. *T. casmiliaensis* (PESSAGNO), which may be correlated with the Bathonian – Kimmeridgian interval. This block represents radiolarian ooze accumulation in the Izmir-Ankara Ocean; it is likely that it was incorporated in an accretionary prism formed during the latest Cretaceous.

The Ildir section crops out in the western part of the Karaburun Peninsula, around the Ildir village; it displays a 10 meter-thick sequence made of thinly-bedded fine-grain greenish-brownish sandstone beds alternating with blackish shales and cherts. The Karareis section displays a sequence made of 30 cm-thick black chert beds; it is located in the Gerence bay of western Karaburun peninsula. The sedimentary sequences of the Ildir and Karareis sections are assigned to the Dikendağı formation; they delivered Devonian radiolarian assemblages, characterized by the presence of *Palaeoscenidium tabernaculum* AITCHISON and *Trilonche davidi* (HINDE). They represent radiolarian ooze accumulation in a fine siliciclastic depositional setting, possibly at the distal part of a Gondwanan margin facing Paleotethys. It is likely that they were incorporated in the Bornova Flysch zone during the Triassic.

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: [merve.mentes@istanbul.edu.tr](mailto:merve.mentes@istanbul.edu.tr)

**Mots-Clés:** radiolaria, Karaburun peninsula, Jurassic, Devonian, paleogeography

## Ecostratigraphy and bio-horizons based on planktonic foraminifers in the Bahamas area over the last 300 ka

Paul Moal-Darrigade <sup>\*ψ1</sup>, Emmanuelle Ducassou <sup>1</sup>, Ludivine Chabaud <sup>1</sup>, Johan Le Goff <sup>2</sup>,  
Jacques Giraudeau <sup>1</sup>, Kelly Fauquembergue <sup>1</sup>, Thierry Mulder <sup>1</sup>

<sup>1</sup> UMR 5805 Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (EPOC) - Univ. Sciences et Technologies - Bordeaux I - France

<sup>2</sup> College of Petroleum Engineering Geosciences – Arabie saoudite

Several biostratigraphical markers based on planktonic foraminifers are known in the tropical and western equatorial Atlantic area. However, recent studies showed that some bio-horizons are diachronous and the extent of these bio-events are very poorly documented at tropical latitudes. This work proposes an ecostratigraphical and biostratigraphical framework based on planktonic foraminifer assemblages over the last ~300 ka, thanks to sedimentary cores collected during the Carambar oceanographic cruises (2010 ; 2014 and 2016-2017) on the northern margins of the Bahamas. These cores are located along the paths of the Antilles Current or the Florida Current.

Planktonic foraminifer countings have been coupled to isotopic data ( $d_{18}O$ ), radiocarbon ages for the most recent sediment, biostratigraphical data based on coccolith acmes and detailed sedimentological analyses (grain size, XRF and component analysis).

The analysis of planktonic foraminifer countings highlighted abundance variations of some species that can be used as biostratigraphic markers. The *Globorotalia menardii* complex and *Globorotalia tumida flexuosa* species allow to identify interglacial periods from Holocene to the MIS8, despite the low abundance of *G. tumida flexuosa*. The *Pulleniatina obliquiloculata* species, despite its low abundances again, presents several useful stratigraphical points such as its temporary disappearance during the MIS3 (diachronous in the western Atlantic) and its reappearance pointing out the limit between MIS1 and 2 (synchronous). The distribution of species *Globorotalia inflata* and *Neogloboquadrina dutertrei* forms interesting bio-horizons during glacials. At the scale of interglacials and especially during the Holocene, abundance variations of species *Globigerinoides ruber alba*, *G. ruber rosea*, *Trilobatus sacculifer* and the *G. menardii* complex allow to propose biozones.

**Mots-Clés:** Ecostratigraphy, Biostratigraphy, Planktonic foraminifera, Bahamas, Holocene, Pleistocene

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: paul.moal@etu.u-bordeaux.fr



## Middle Devonian bioevents in NW Algerian Sahara: the microfaunal contribution (conodonts, tentaculites)

Carine Randon <sup>\*1</sup>, Radia Tandjaoui-Arif <sup>1/2</sup>, Abdelkader Ouali Mehadji <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06 – UMR 7207, MNHN – France

<sup>2</sup> Laboratoire « Paléontologie stratigraphique Paléoenvironnements », Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences de la Terre et de l’Université d’Oran 2 – Algérie

Given the opportunity to conduct a detailed study of Middle Devonian bioevents in the Algerian Sahara we focus here on two globally recognized bioevents, the Choteč, *otomari* (or Kačák) and Taghanic events.

An integrated study including a description of micro- and macro-faunas (tentaculites *s.l.*, conodonts, ostracods, goniatites) as well as a sedimentological analysis, was conducted on two sections (Marhouma or "km 30", Erg El Djemel) located on the NW platform of the Algerian Sahara. The present work focuses on the tentaculites *s.l.* and the conodonts. The preliminary results obtained with microfossils show that these events are associated with stratigraphic levels that record highly abundant tentaculites *s.l.* The latter are mainly dacryoconarids and more specifically belong to the genera *Nowakia* and *Styloolina*. The identified microfossils have also allowed to calibrate biostratigraphically the Choteč, Kačák (or *otomari*) and *pumilio* events.

**Mots-Clés:** bioevents, tentaculites, conodonts, Middle Devonian

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>1/2</sup>Auteur correspondant: tanradia@gmail.com

## Early-Middle Miocene monsoon-type climatic variability in the Eastern Mediterranean: Kottaphi Hill Section, Cyprus Island

Maria Triantaphyllou <sup>\*1</sup>, Maria Athanasiou , Margarita Dimiza , Agnieszka Arabas , Ioannis Panagiotopoulos , Katerina Kouli , Ioanna Bouloubassi , Elisavet Skampa , Constantine Panagiotaropoulos , Efthymios Tsiolakis , Georgios Theodorou , Alexandra Gogou

<sup>1</sup> Faculty of Geology Geoenvironment, National and Kapodistrian Univ. of Athens, Panepistimioupolis 15784, Athens - Greece

The Kottaphi Hill Section (KHS) on Cyprus Island represents a well-exposed complete sequence of the hemipelagic Pakhna Formation with rhythmically bedded chalks and marls, most probably correlated to all three Earth's orbital parameters and reflecting the Miocene relative sea-level change (e.g., Davies, 2001). The current work aims to provide solid evidence for monsoon-type climatic variability during the Early-Middle Miocene in the Eastern Mediterranean. Seventeen laminated siltstone layers (3–10 cm thick), matching with the precession-scale cyclicity, were found exposed in-between 20.4–42.0 m of KHS and interbedded within 114 chalk / marly chalk / chalky marl alternations. These siltstones may be interpreted as transgressive basin-plain deposits, while the carbonate facies can be considered as hemipelagic sediments of the regressive stages of the relative sea-level change. The studied sediment sequence is dated between 15.1 Ma (FO *Orbulina suturalis* at 16.4 m) and 11.6 Ma (LO *Discoaster kugleri* at 36.7 m). The organic carbon (OC) contents of the thin siltstone units appear quite higher, up to 0.36%, compared to the OC values in the chalk / chalky marl layers (0.17% on average). Carbon and oxygen composition analyses carried out on the planktonic foraminifera *Orbulina universa* indicate heavier values of  $\delta^{18}\text{O}$  (0.06‰ on average) within the low OC chalk / marly chalk / chalky marl layers. In contrast, for the thin laminated siltstones lighter  $\delta^{18}\text{O}$  signatures (up to 0.95 ‰) are exhibited, suggesting warmer temperatures and enhanced precipitation. Superimposed oxygen isotope excursions are associated with the Miocene Mi3a-Mi5 events, commonly interpreted as a record of brief glaciations. The positive excursions of the calcareous nannofossil species *Discoaster* spp., *Sphenolithus* spp. and *Rhabdosphaera* spp. within the OC-enriched siltstone layers provide evidence for warm oligotrophic surface waters and stratified conditions coupled with a salinity decrease (increment of *Helicosphaera* spp.), whereas plant remains and palynological evidence suggest fluxes of terrestrial organic matter triggered by vigorous river discharges during the monsoon seasons. The foraminiferal content comprising > 90% of the planktonic specimens refers to the lower epibathyal zone, however, the extremely rare benthic forms represented by the oxic-preference taxa *Gyroidinoides*, *Uvigerina*, *Nodosaria* and *Hoeglundina* indicate a well-oxygenated seafloor. All available evidence propose a shift to monsoonal activity between 15.1–11.6 Ma without, however, the regional depositional and hydrographic regime being appropriate for this signal to be preserved as sapropelic facies in the KHS sediment record.

\*Intervenant

**Mots-Clés:** Miocene, Cyprus, paleoclimate, calcareous nannofossils, foraminifera, isotopes, palynomorphs, sedimentary sequence



### **3.3 Paleobiosphère paléoécologie : Vie et paléoenvironnements au Précambrien**

## Fossilisation d'une activité métabolique bactérienne dans des roches de 2,1 milliards d'années, Gabon

Jérémie Aubineau <sup>\*ψ1</sup>, Abderrazak El Albani <sup>1</sup>, Armelle Riboulleau <sup>2</sup>

<sup>1</sup> UMR 7285 CNRS (IC2MP-HydrASA) – Université de Poitiers : UMR7285 CNRS IC2MP-HydrASA – 4, rue Michel Brunet 86073 POITIERS CEDEX 9, France

<sup>2</sup> Université Lille 1 (UMR LOG) – Université Lille I - Sciences et technologies, CNRS : UMR8187 – UFR des Sciences de la Terre bâtiment SN5, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex, France

La série Francevillienne datée de 2,1 milliards d'années au Gabon héberge les plus vieux macro-organismes coloniaux en association avec une grande diversité structurelle de voiles bactériens. Les échantillons ont été prélevés dans un intervalle de 20 mètres d'épaisseur. Les faciès les plus représentatifs correspondent à des grès et des black shales. Une étude multi-approches a été réalisée sur une trentaine de spécimens représentés par les sédiments encaissants et les voiles microbiens provenant de différents niveaux dans la série. Ils présentent des morphologies et des compositions variées. Les minéralisations biologiquement induites sont largement rapportées à l'Archéen cependant, les microbes ou les biofilms bactériens capables de favoriser la précipitation de minéraux argileux authigéniques dans des environnements naturels sont peu décrits. L'analyse géochimique de roche totale montre un ratio K<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> plus élevé dans les biofilms comparés à leurs encaissants indiquant ainsi, un enrichissement local du potassium (K). L'analyse des diffractogrammes de la fraction argileuse < 2 µm, à la fois sur les voiles bactériens et le sédiment alentour, a révélé des différences significatives dans la composition minéralogique des argiles. L'assemblage des minéraux argileux est dominé par des interstratifiés illite-smectite désordonnés riches en smectite (R0) dans le sédiment encaissant alors qu'il est représenté par des interstratifiés illite-smectite ordonnés riches en illite (R3) dans les voiles bactériens. Ceci est supporté par l'observation au microscope électronique à transmission (MET) qui montre une dominance de particules bien cristallisées, hexagones et lattes de grande taille, seulement dans les biofilms. L'avancement du processus d'illitisation nécessite une disponibilité du K qui ne peut pas être fournie par les feldspaths potassiques détritiques à cause de leur absence dans le bassin de Franceville. Ainsi, l'activité biologique a probablement favorisé, localement, le processus d'illitisation en approvisionnant le milieu en K. Finalement, les analyses à la micro-échelle des voiles microbiens du Francevillian pourraient permettre de nouveaux aperçus dans la recherche de signatures biologiques dans des sédiments dépourvus de feldspaths potassiques comme ceux de la Terre primitive.

**Mots-Clés:** Voiles bactériens, Illitisation, Paléoproterozoïque, Gabon

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: jeremie.aubineau@univ-poitiers.fr

## Analyse de minéralogie magnétique fine d'échantillons provenant d'un intervalle glaciaire découvert à la fin de l'archéen

Julie Carlut <sup>\*ψ1</sup>, Aude Isambert <sup>\*φ1</sup>, Adèle Nivart <sup>1</sup>, Hélène Bouquerel <sup>1</sup>, Pascal Philippot <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut de Physique du Globe de Paris, Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, 1 rue Jussieu, F-75238 Paris Cedex 05 (IPGP) – UMR 7154 – France

<sup>2</sup> Géosciences Montpellier, Université de Montpellier, Montpellier Cedex 5 – UMR 5243 – France

Les formations de fer rubané (BIF) de Boolgeeda sont des roches sédimentaires datant de la fin de l'archéen montrant une alternance entre des couches riches en oxydes de fer (typiquement hématite et magnétite) et en silicates (typiquement micro quartz).

Plusieurs hypothèses existent quant aux processus de formation des BIF. Les plus récentes suggèrent un lien entre photosynthèse et oxydation du fer au sein d'un environnement marin de composante fortement hydrothermale. Afin de mieux contraindre les liens de causalité entre activité biologique et oxydation du fer, une étude magnétique approfondie a été menée sur un intervalle restreint du forage TCDP (craton de Pilbara) qui traverse environ 70 m des fers rubanés de Boolgeeda et daté aux alentours de 2,45 Ma (Caquineau et al., 2018). Nous nous sommes intéressés à un petit intervalle identifié comme étant un dépôt glaciaire. Une attention particulière a été portée sur les transitions entre les BIF et les couches caractéristiques de ce dépôt. L'évolution de la minéralogie magnétique a été déterminée à l'aide des techniques du magnétisme environnemental (susceptibilité et hystérésis magnétique, aimantation rémanente isotherme et à basse température) associées à des observations microscopiques (MEB, MET).

Les résultats obtenus montrent un signal magnétique du dépôt glaciaire très faible (de l'ordre de 10-3 Am<sup>2</sup>/kg), en comparaison des BIF (de l'ordre de 40 Am<sup>2</sup>/kg). Ce faible signal magnétique peut se justifier par le fait que les oxydes de fer et leurs précurseurs, les oxyhydroxydes de fer, n'auraient pas pu se former pendant l'intervalle glaciaire. Un recouvrement de la surface par une couche de glace pourrait fortement réduire l'activité photosynthétique et expliquer ce résultat.

Caquineau, T., Paquette, J. L., & Philippot, P. (2018). U-Pb detrital zircon geochronology of the Turee Creek Group, Hamersley Basin, Western Australia: timing and correlation of the Paleoproterozoic glaciations. *Precambrian Research*.

**Mots-Clés:** Archéen, minéralogie magnétique, intervalle glaciaire, vie primitive

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: carlут@ipgp.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: isambert@ipgp.fr

## Nanoanalysis of 720–800 My-old microfossils from the Draken Formation, Spitsbergen

Alexandre Fadel <sup>\*1</sup>, Kevin Lepot <sup>1</sup>, Sylvain Bernard <sup>2</sup>, Ahmed Addad <sup>3</sup>, Armelle Riboulleau <sup>1</sup>, Andrew H. Knoll <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, Université de Lille, CNRS, Université Littoral Côte d'Opale, UMR8187, Cité Scientifique SN5, 59655 Villeneuve d'Ascq, France (LOG) – Université des Sciences et Technologies de Lille - Lille I - France

<sup>2</sup> Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie, CNRS UMR 7590, MNHN, UPMC, 61 rue Buffon, 75005 Paris, France (IMPMC) – Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR206, CNRS : UMR7590, Museum National d'Histoire Naturelle – France

<sup>3</sup> Unité Matériaux et Transformations, Université de Lille, CNRS UMR 8207, Cité Scientifique C6, 59655 Villeneuve d'Ascq, France (UMET) – Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Lille, Université de Lille, CNRS : UMR8207 – France

<sup>4</sup> Department of Organismic and Evolutionary Biology, Harvard University, 26 Oxford Street, Cambridge MA 02138, USA – États-Unis

Silicified clasts of peritidal microbial mats deposited in lagoonal flake conglomerates of the Draken Formation, Spitsbergen, are dominated by mat-building filaments and include diverse fossils of benthic and/or allochthonous (possibly planktonic) microorganisms. This assemblage occurs at a turning point in the evolution of photosynthetic primary producers, before a major diversification of photosynthetic eukaryotes and the Neoproterozoic Oxygenation Event. Because of their excellent preservation, Draken microfossils have the potential to provide new criteria for the phylogenetic interpretation of older microfossils. Moreover, the taxonomy of a number of fossil microorganisms has remained difficult to constrain. Here, we characterized the ultrastructure and composition of organic matter in various microfossils using a combination of Scanning transmission electron microscopy (STEM), Raman spectroscopy and Scanning transmission X-ray microscopy (STXM). Although the molecular composition appeared homogenous with these techniques and essentially aromatic, the microfossils preserve delicate ultrastructures, some of which cannot be distinguished under the optical microscope. We distinguish the nanoscale texture of sheaths and layered sheath structures in fossil cyanobacteria, revealing membranous internal contents in addition to the granular cell contents of examined fossils. In the problematic *Myxococcoides*, an unexpected wall texture brings some support to the hypothesis that these could represent eukaryotes rather than cyanobacteria. Finally, we describe for the first time the nanoscale ultrastructure of vase-shaped microfossils interpreted as testate amoebae. Altogether, nanoscale studies provide unprecedented insights into the taphonomy and taxonomy of this emblematic microfossil assemblage.

**Mots-Clés:** microfossils, Draken, Neoproterozoic, ultrastructure

<sup>\*</sup>Intervenant

## The Lu-Hf isotope geochemistry of Banded Iron Formations: Secular evolution and evidence for emerged continents 3.2 billion years ago

Ian Foster <sup>\*1</sup>, Arnaud Agranier <sup>2</sup>, Inga Köhler <sup>3</sup>, Martin Homann <sup>1</sup>, Christoph Heubeck <sup>4</sup>,  
Philippe Nonnotte <sup>5</sup>, Kurt Konhauser <sup>6</sup>, Aradhna Aradhna Tripati <sup>7</sup>, Stefan Lalonde <sup>1</sup>

<sup>1</sup> European Institute for Marine Studies, CNRS-UMR6538 Laboratoire Géosciences Océan - Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), UMR 6538 LGO, IUEM-UBO – France

<sup>2</sup> Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM) – Université de Bretagne Occidentale (UBO) – Technopôle Brest-Iroise, Place Copernic, 29280 Plouzané, France

<sup>3</sup> Department of Geosciences, Friedrich-Schiller-University Jena, Jena 07749, Germany – Allemagne

<sup>4</sup> Department of Geosciences, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Germany – Allemagne

<sup>5</sup> IUEM, Université de Bretagne Occidentale – Université de Bretagne Occidentale [UBO] – France

<sup>6</sup> Department of Earth and Atmospheric Sciences – Edmonton, Alberta, T6G 2E3, Canada

<sup>7</sup> Earth Planetary and Space Sciences/Atmospheric and Ocean Sciences/Institute of Environment and Stability, UCLA, Los Angeles, CA, 90095, USA. – États-Unis

Recent studies have indicated the potential of Archean and Proterozoic Banded Iron Formations (BIF) to trace continental emergence via the preservation of Lu-Hf-Sm-Nd isotope signatures specific to subaerial weathering [1,2]. Here we present detailed isotopic measurements from one of the best-preserved Paleoarchean BIF occurrences, the 3.22 Ga Moodies Group BIF, Barberton Greenstone Belt, South Africa. Samples show eHf (3.22 Ga) values that range from -14.7 to +36.6, among the most extreme ranges measured in the sedimentary record. Their Hf-Nd isotope systematics depart significantly from the terrestrial array, which can only be explained by sedimentary transport and weathering under subaerial conditions [1,2,3]. Our findings constitute strong geochemical evidence of subaerial weathering affecting oceanic chemistry and provide a critical datum that establishes emerged continents as an ecological niche and source of nutrients by 3.22 Ga. Additional data from the 750 Ma Braemar Iron formation, South Australia, and the 3.8 Ga Isua Banded Iron formation, Greenland (our unpublished data), combined with data from literature, indicate secular evolution of initial eHf in BIF over time, with highly radiogenic signatures present throughout the Archean, evolving to values comparable to the modern seawater array by the Late Proterozoic, which might be explained by a decrease in the intensity of chemical weathering over the last 3.8 Ga.

Viehmann, S., Hoffmann, J. E., Münker, C. & Bau, M. Decoupled Hf-Nd isotopes in Neoarchean seawater reveal weathering of emerged continents. *Geology* 42, 115–118 (2014).

Viehmann, S., Bau, M., Hoffmann, J. E. & Münker, C. Decoupled Hf and Nd isotopes in suspended particles and in the dissolved load of Late Archean seawater. *Chem. Geol.* 483, 111–118 (2018).

Merschel, G., Bau, M., Schmidt, K., Münker, C. & Dantas, E. L. Hafnium and neodymium isotopes and REY distribution in the truly dissolved, nanoparticulate/colloidal and suspended loads of rivers in the Amazon Basin, Brazil. *Geochim. Cosmochim. Acta* 213, 383–399 (2017).

**Mots-Clés:** Paleoarchean, Continents, Hafnium isotopes

\*Intervenant

## Sources du plomb et des fluides dans le gisement géant de Pb-Zn de HYC (bassin de McArthur, Australie)

Joséphine Gigon <sup>\*1</sup>, Etienne Deloule <sup>2</sup>, Julien Mercadier <sup>1</sup>, Antonin Richard, Roger Skirrow, Andrew Wygralak, David Huston, Irvine Annesley

<sup>1</sup> Laboratoire Géoressources Université de Lorraine (GéoRessources Vandoeuvre les Nancy)  
Université de Lorraine

<sup>2</sup> Centre de recherches pétrographiques et géochimiques (CRPG) - CNRS : UMR5873, INSU, Université de Lorraine  
15 Rue Notre Dame des Pauvres - BP 20 54501 VANDOEUVRE LES NANCY CEDEX - France

Le bassin protérozoïque de McArthur (Australie) renferme le gisement de Pb-Zn de classe mondiale de HYC (ou McArthur River) de type SEDEX ainsi que de nombreux indices en Pb-Zn, comme ceux de Caranbirini et Myrtle. Ceux-ci sont situés à proximité de la Emu Fault, qui a probablement drainé les fluides minéralisateurs (Large et al., 1998). La minéralisation est très majoritairement synsédimentaire et stratiforme (sous forme de plusieurs lentilles dans le cas de HYC) dans les argilites de la formation de Barney Creek, ou sous forme de veines discordantes plus tardives. L'âge du gisement de HYC est contraint par des datations U-Pb sur zircon réalisées sur des tuffs interlités avec les sédiments à 1640 ±3 Ma (Page et Sweet, 1998), ce qui permet d'avoir un point de contrôle robuste pour l'âge de la minéralisation.

La composition isotopique du plomb des galènes ainsi que la composition en éléments traces des galènes et des sphalerites ont été déterminées, respectivement par sonde ionique et LA-ICPMS, afin de tracer les sources du plomb. Jusqu'à présent, la composition isotopique du plomb dans les galènes avait été étudiée uniquement par méthode globale, impliquant des effets de moyenne potentiels. Dans ce travail, les sulfures de petite taille (50 µm) et des plages homogènes de sulfures de plus grande taille mais riches en inclusions d'autres sulfures ou de minéraux de gangue ont été analysés pour la première fois, afin de pouvoir obtenir des contraintes plus fines sur le mode et l'âge de formation de ces dépôts. De telles analyses in-situ ont été rendues possibles par un échantillonnage ciblé et une recherche minutieuse de plages homogènes et de taille suffisante pour être analysées par ces instruments.

Les compositions isotopiques du Pb des galènes reportées dans un diagramme  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  définissent une droite de mélange entre deux pôles, et non une isochrone secondaire. Les résultats montrent ainsi pour la première fois que le gisement de HYC s'est formé par le mélange de deux fluides contenant chacun du plomb d'origine crustale et ayant mobilisé deux sources de plomb distinctes : une première composée d'anciennes galènes formées autour de 1800 Ma et une deuxième de même âge que le gisement lui-même et probablement liée à la formation encaissante de Barney Creek.

Large, R.R., Bull, S.W., Cooke, D.R., McGoldrick, P.J., 1998. Economic Geology 93, 1345–1368.  
Page, R.W., Sweet, I.P., 1998. Aust. J. Earth Sci. 45, 219–232.

<sup>\*</sup>Intervenant

## Terrestrial microbial mats and biogeochemical cycling on land 3,220 Myr ago

Martin Homann <sup>\*ψ1</sup>, Pierre Sansjofre <sup>1</sup>, Mark Van Zuilen <sup>2</sup>, Christoph Heubeck <sup>3</sup>, Jian Gong <sup>2</sup>,  
Bryan Killingsworth <sup>1</sup>, Ian Foster <sup>1</sup>, Alessandro Airo <sup>4</sup>, Martin Van Kranendonk <sup>5</sup>, Stefan Lalonde <sup>6</sup>

<sup>1</sup> European Institute for Marine Studies, CNRS-UMR6538 Laboratoire Géosciences Océan – Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), UMR 6538 LGO, IUEM-UBO – France

<sup>2</sup> Institut de Physique du Globe de Paris, CNRS-UMR7154 – Institut de Physique du Globe de Paris – France

<sup>3</sup> Department of Geosciences, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Germany – Allemagne

<sup>4</sup> Center of Astronomy and Astrophysics, Technische Universität Berlin, Germany – Allemagne

<sup>5</sup> School of Biological, Earth and Environmental Sciences, University of New South Wales, Australia – Australie

<sup>6</sup> European Institute for Marine Studies, CNRS-UMR6538 Laboratoire Géosciences Océan – Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM) – France

The microbial colonization of the first emergent continental landmasses was certainly one of the biggest evolutionary steps in Earth history. However, current evidence for early terrestrial life is indirect and derived almost exclusively from the textural and geochemical study of paleosols. This has recently been pushed back as far as 3,000-3,220 Myr ago but the evidence remains indirect. We report on what we believe is the earliest direct fossil evidence for life on land in the form of terrestrial microbial mats draping fluvial conglomerates and sandstones of the Pa-leoarchean Moodies Group, South Africa, the world's oldest known alluvial to tidal deposit. Field, petrographic, and geochemical analyses confirm the fluvial habitat of these unique fossil mats as well as their biogenicity and syn-sedimentary origin. Carbon isotope analysis of the preserved kerogen extracted from these mats reveal  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  values centered around -21‰, in contrast to fossil mats of marine origin from nearby tidal deposits which show values as low as -34‰. Bulk nitrogen isotope compositions of the fluvial mats ( $-2 < \delta^{15}\text{N} < 5\text{\textperthousand}$ ) also differ significantly from their marine counterparts ( $0 < \delta^{15}\text{N} < 3\text{\textperthousand}$ ), which we interpret to reflect denitrification in the terrestrial habitat, possibly of an atmospheric source of nitrate. These newly discovered terrestrial mat fossil from the Moodies Group constitute the oldest macroscopically-visible trace of life on land and support the antiquity of a thriving terrestrial biosphere with distinct biogeochemical cycling occurring on land by 3,220 Myr ago.

**Mots-Clés:** Early life, Archean, South Africa, Barberton Greenstone Belt, Moodies Group, Fluvial sandstone, Microbial mat, C and N isotopes

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: martin.homann@univ-brest.fr

## Fossilisation expérimentale : Influence de la présence de phases minérales sur la dégradation de l'ARN

Pierre Jacquemot <sup>\*1</sup>, Sylvain Bernard<sup>ψ2</sup>, Thomas Georgelin <sup>3</sup>, Corentin Le Guillou <sup>4</sup>,  
Jean-Christophe Viennet <sup>2</sup>, Maguy Jaber <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Archéologie Moléculaire et Structurale (LAMS) – Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, CNRS : UMR8220 – France

<sup>2</sup> Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie (IMPMC) – Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR206, CNRS : UMR7590, Museum National d'Histoire Naturelle, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6 : UM120 – France

<sup>3</sup> Centre de biophysique moléculaire (CBM) – Université d'Orléans : UPR4301, Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale : UPR4301, CNRS : UPR4301 – France

<sup>4</sup> Unité Matériaux et Transformations - UMR 8207 (UMET) – Institut National de la Recherche Agronomique : UMR0638, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Lille, Université de Lille, CNRS : UMR8207 – France

Décoder l'enregistrement fossile ancien pose de nombreuses difficultés. Les organismes du précambrien uniquement constitués de matière organique ont en effet laissé peu de traces et ont connu d'importantes transformations au cours de leur fossilisation. Outre l'utilisation de techniques analytiques permettant d'en décrire la composition chimique à toutes les échelles, l'identification de microfossiles dans les roches anciennes nécessite de bien comprendre les processus de fossilisation des molécules organiques issues du vivant. Afin d'identifier les principaux paramètres intervenant dans la dégradation des microfossiles anciens, nous développons une approche expérimentale pour mieux contraindre l'évolution géochimique et minéralogique d'assemblage organo-minéraux au cours de la diagénèse thermique. Notre étude se focalise en particulier sur la dégradation de l'ARN, molécule commune à tous les êtres vivants dans l'hypothèse dite " du monde à ARN ". Nous avons mené des séries d'expériences à 200 °C en conditions hydrothermales en présence ou non de différentes phases minérales amorphes (gels de composition argileuse ou siliceuse) et avec des rapports eau/minéral variables. La caractérisation microscopique et spectroscopique a permis de mettre en évidence l'influence de la matrice minérale et de la quantité d'eau sur la cinétique des processus de dégradation de l'ARN. Les composés organiques des résidus expérimentaux sont en effet très différents selon la phase minérale en présence. En parallèle, ces expériences montrent que la présence d'ARN modifie significativement la cristallisation des phases minérales et conduit à la formation de différentes phases minérales plus ou moins associées aux molécules organiques. Ces résultats expérimentaux remettent en perspective les récentes controverses autour des plus vieilles traces de vie sur Terre et soulignent l'importance de systématiquement caractériser les phases minérales et les phases organiques pour discuter de la biogénicité de potentiels microfossiles archéens.

**Mots-Clés:** Fossilisation expérimentale, interactions minéraux/matière organique, argiles

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: sbernard@mnhn.fr

## Constraining Paleoproterozoic meteoric water and air O<sub>2</sub> with triple oxygen isotopes in sulfate

Bryan Killingsworth \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géosciences Océan (LGO) – Université de Brest, CNRS, Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM) – France

Earth's atmosphere first became oxygenated during the Great Oxidation Event (GOE), circa 2.5 to 2.3 Ga, with major implications for the evolution of Earth's surface and biosphere. The triple oxygen isotope compositions ( $\delta^{18}\text{O}$  and  $'^{17}\text{O}$ ) of sulfate such as that from carbonate- associated sulfate, evaporite minerals, and barite in the rock record contains signals of surface waters and oxidants that can be used to better understand the GOE and associated events such as the Paleoproterozoic (Huronian) snowball Earth glaciations. However, thus far sulfate oxygen isotope records from during the GOE are lacking. New triple oxygen isotope results from barites extracted from the < 2.31 Ga Kazput Formation of the Turee Creek Group, W. Australia, implicate meteoric water ( $\delta^{18}\text{O}$ -barite down to -19.7‰) as well as air O<sub>2</sub> ( $'^{17}\text{O}$ - barite down to -0.18‰) as oxidants involved in the formation of this sulfate. Such low  $\delta^{18}\text{O}$  in sulfate are rare in the rock record, but have been observed previously in glacial diamictite from the Neoproterozoic Marinoan snowball Earth event, thus implying some similarity for Huronian snowball Earth events as well. The  $'^{17}\text{O}$  data reveal that free O<sub>2</sub> was indeed present at the Earth's surface in the aftermath of Paleoproterozoic snowball Earth. This dataset reveals the promise of sulfate oxygen records for better understanding the history of Earth's oxygenation and its climatic context.

**Mots-Clés:** Great Oxygenation Event, hydrosphere, atmosphere, paleoclimate, triple oxygen isotopes, snowball Earth, glaciation

\*Intervenant

## Project EARTHBLOOM: field and drill core study of Earth's oldest carbonate platform (2.94 Ga Red Lake Greenstone Belt, Ontario, Canada)

Stefan Lalonde <sup>\*ψ1</sup>, Pierre Sans Jofre , Martin Homann <sup>2</sup>, Marie Thobé <sup>3</sup>, Munira Afroz , Bryan Killingsworth <sup>2</sup>, Timothy McIntryre , Sophie Kurucz , Oanez Lebeau , Sean Timpa , Kurt Konhauser , Robert Riding , Philip Fralick

<sup>1</sup> Laboratoire Géosciences Océan, IUEM, UBO, 29280 Plouzané, France. (LDO) – 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 – France

<sup>2</sup> European Institute for Marine Studies, CNRS-UMR6538 Laboratoire Géosciences Océan - Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), UMR 6538 LGO, IUEM-UBO – France

<sup>3</sup> Laboratoire Géosciences Océan - Université de Bretagne Occidentale (LGO - UBO) – Université de Bretagne Occidentale [UBO], Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), CNRS : UMR6538 – France

One of the major consequences of photosynthesis is locally increased carbonate alkalinity, which stimulates the precipitation of carbonate minerals in aqueous environments. On the modern Earth, reef-type ecosystems occupy the most productive end of the oxygen- and carbonate-producing spectrum. However, prior to about 700 million years ago, photosynthetic bacteria fulfilled this role, building reef-like microbialite (e.g., stromatolite) structures, and eventually whole carbonate platforms, out of the carbonate minerals they help precipitate as a consequence of their alkalinizing effect. Rather shockingly, the most ancient examples of these systems, dating back to ca. 3.0 Ga, remain little explored. The EARTHBLOOM project examines in detail the stratigraphy, major element and trace element geochemistry of drill core from the 2,940 +/- 2 Ma to 2,925 +/- 3 Ma Ball assemblage, Red Lake Greenstone belt, N. Ontario, Canada. This deposit contains over 400m of metasedimentary rocks that include over 200m of stromatolitic calcite and dolostone carbonates, making it the earliest known significant accumulation of carbonate on the planet. The sedimentary sequence reveals the drowning of a shallow carbonate platform, initiated on volcanoclastics and terminated by transgression to BIF and shale. Trace element data indicate general anoxia during precipitation of carbonate lithofacies. At the same time, Mo isotope data suggest that oxic cycling of Mo was occurring in the global ocean, echoing previous claims for the presence of oxygenic photosynthesis as far back as 2.9 – 3.2 Ga. Relatively abundant pyrite and potential pseudomorphs after gypsum may demonstrate an evaporative concentration of sulfate, and sulfur isotope studies are currently underway. The ensemble of data available to date indicates that the Red Lake carbonate platform represents an evaporitic setting, with locally concentrated sulfate, and remarkably, little evidence for the presence of cyanobacteria.

**Mots-Clés:** Precambrian, carbonate, stromatolite, carbon

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: stefan.lalonde@univ-brest.fr

## Microfossil-mimicking textures in Archean and Paleoproterozoic rocks

Kevin Lepot <sup>\*1</sup>, Abderrazak El Albani <sup>2</sup>, Stellina Lekele Baghekema <sup>1,2</sup>, Armelle Riboulleau <sup>1</sup>, Kenichiro Sugitani <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - CNRS ; Université de Lille ; Université Littoral Côte d'Opale : UMR8187 – France

<sup>2</sup> Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers (IC2MP) – Université de Poitiers, CNRS UMR 7285 – France

<sup>3</sup> Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University – Japon

Archean and Paleoproterozoic microfossils are difficult to identify due to their simple shapes such as tubes and spheres, and due to their alteration during diagenesis, metamorphism, and/or metasomatism. In addition, several processes have been shown to mimic microfossils, leading to difficulties to demonstrate a cellular origin. These processes include opal growth, quartz (re)crystallization, which are particularly relevant for Precambrian microfossil assemblages where microfossils are most commonly preserved in cherts/quartzites. Moreover, textures of volcanic rocks produced by quenching (tubes, vesicles), crystallization (microlites) and alteration (meta- somatism and metamorphism) may also resemble microfossils when they are coated with organic matter. Here, we investigate cell-like structures in a silicified volcanic sandstone and dolomitic chert from the ca. 2.1 Ga Francevillian Series of Gabon, and in a silicified volcanic sandstone of the ca. 3.4 Ga Strelley Pool Formation of Australia using a combination of optical microscopy, Raman spectromicroscopy, scanning electron microscopy, and scanning transmission electron microscopy. The Francevillian rocks display evidence of hydrocarbon migration in the shape of carbonaceous veins. Spherical vesicles in grains of probable volcanoclastic origin in the Francevillian rock BAM5 display carbonaceous coatings. In the Francevillian dolomitic chert (LEK\_180), sub-spherical organic structures are also observed in carbonate crystals and grains that are coated and interspersed with organic matter. The studied Strelley Pool Formation sample WRSL1 is also dominated by silicified volcanoclastic grains, some of which display tubular and sub-spherical textures reminding of microfossils. These potentially abiogenic structures are compared down to the nanoscale with microfossils previously reported in volcanoclastic and non-volcanoclastic rocks of the same ages. The composition and texture of matrix minerals and the texture of organic matter at the sub-micrometric scale contrast sharply between these potentially abiogenic structures and genuine microfossils. These, in addition to the general petrographic context, provide criteria to distinguish potential abiotic mimics.

**Mots-Clés:** microfossils, Archean, Proterozoic, abiotic

<sup>\*</sup>Intervenant

## Le Briovérien et la transition Ediacarien-Cambrien dans le Massif Armoricain

Didier Néraudeau <sup>\*1</sup>, Marc Poujol <sup>ψ1</sup>, Romain Gougeon <sup>1</sup>, Marie-Pierre Dabard <sup>1</sup>,  
Abderrazak El Albani <sup>2</sup>, Alfredo Loi <sup>3</sup>, France Polette <sup>1</sup>, Jean-Paul Saint-Martin <sup>4</sup>,  
Simona Saint-Martin <sup>4</sup>, Baptiste Boisvert <sup>1</sup>, Madeline Chapelet <sup>1</sup>, Landry Guillois <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Rennes 1, CNRS, Géosciences Rennes UMR 6118 (GR) - Université de Rennes 1, Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes, INSU, CNRS : UMR6118 - France

<sup>2</sup> Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers (IC2MP) - Université de Poitiers, CNRS : UMR7285 - France

<sup>3</sup> Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche, Università degli Studi di Cagliari, Sede di Scienze della Terra, Via Trentino, 51, 09127 Cagliari ; Italy - Italie

<sup>4</sup> Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) - UMR 7207, MNHN - France

Le Briovérien est une entité géologique qui affleure très largement dans le Massif Armoricain, épaisse de plus de 1000m et composée de faciès variés de conglomérats, de grès, et de siltites, produits depuis des zones côtières jusqu'à des contextes turbiditiques profonds. Elle est étudiée depuis la fin du XIXème siècle et reste pourtant mal datée et considérée, à tort, azoïque. Tout juste osait-on l'attribuer à la transition Ediacarien-Cambrien sans pour autant pouvoir identifier et localiser cette limite géologique fondamentale.

L'étude récente et détaillée de nombreux sites du Finistère, du Morbihan, d'Ille-et-Vilaine et de Normandie permet pourtant d'apporter deux gammes d'informations qui en donnent une idée stratigraphiquement plus précise et paléontologiquement moins austère.

D'une part, le Briovérien supérieur (584 à 540 Ma) présente localement des dépôts fossilifères, contenant essentiellement des ichnofossiles horizontaux générés par des métazoaires vermiformes (*Helminthoidichnites tenuis*, *Helminthopsis tenuis*, *Gordia marina*) mais aussi plus ponctuellement des fossiles d'algues macroscopiques (*Chuaria*), de métazoaires discoïdes (*Beltanelloides*, ?*Nimbia*), ou d'annélides indéterminés.

D'autre part, les datations radiochronologiques sur grains de zircons détritiques issus de dépôts du Briovérien et provenant de six sites en Bretagne et trois sites en Normandie, fossilifères ou non, dévoilent des cortèges d'âges dont les plus récents plaident, selon les sites, pour de l'Ediacarien final (550 Ma) ou du Cambrien (540 Ma, voire 530 Ma).

Qu'il s'agisse d'Ediacarien avéré ou de Cambrien inférieur, le Briovérien n'est donc pas à négliger dans la caractérisation du passage Précambrien-Paléozoïque en Europe, et peut apporter de précieuses informations paléontologiques et stratigraphiques.

**Mots-Clés:** Briovérien, Massif Armoricain, ichofossile, métazoaire, U/Pb

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: didier.neraudeau@univ-rennes1.fr

## Globally asynchronous sulphur isotope signals require re-definition of the Great Oxidation Event

Pascal Philippot <sup>\*ψ1</sup>, Janaina Avila <sup>2</sup>, Bryan Killingsworth <sup>3</sup>, Svetlana Tessalina <sup>4</sup>, Tom Caquineau <sup>5</sup>, Elodie Muller <sup>5</sup>, Ernesto Pecoits <sup>6</sup>, Pierre Cartigny <sup>5</sup>, Stefan Lalonde <sup>7</sup>, Trevor Ireland <sup>2</sup>, Christophe Thomazo <sup>8</sup>, Martin Van Kranendonk <sup>9</sup>, Vincent Busigny <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Géoscience Montpellier – CNRS, Université de Montpellier – France

<sup>2</sup> Australian National University (ANU) – Australie

<sup>3</sup> Domaines Océaniques (LDO) – Université de Bretagne Occidentale (UBO), Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), Institut d’écologie et environnement, INSU, CNRS : UMR6538 – France

<sup>4</sup> John de Laeter Centre for Isotopic Research, Curtin University – Kent St 6102, Bentley, WA, Australie

<sup>5</sup> Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) – IPG PARIS, Université Paris Diderot - Paris 7, Université de la Réunion, CNRS : UMR7154 – France

<sup>6</sup> Instituto de Ciencias Geológicas, Universidad de la República, Montevideo – Uruguay

<sup>7</sup> Domaines Océaniques (LDO) – 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

<sup>8</sup> Biogéosciences [Dijon] (BGS) – CNRS : UMR6282, Université de Bourgogne, AgroSup Dijon - Institut National Supérieur des Sciences Agronomiques, de l’Alimentation et de l’Environnement : UMR6282, AgroSup Dijon - Institut National Supérieur des Sciences Agronomiques, de l’Alimentation et de l’Environnement : UMR6282, AgroSup Dijon - Institut National Supérieur des Sciences Agronomiques, de l’Alimentation et de l’Environnement : UMR6282 – France

<sup>9</sup> The University of New South Wales (AUSTRALIA) – High St Kensington, NSW 2052, Australie

The Great Oxidation Event (GOE) has been defined as the time interval between 2.50 and 2.32 billion years (Ga) ago when sufficient atmospheric oxygen accumulated to prevent the generation and preservation of mass-independent fractionation of sulphur isotopes (MIF-S) in sedimentary rocks. Existing correlations suggest that the GOE occurred later in South Africa than in North America. This confounds expectations that the GOE was rapid and globally synchronous and supports previous suggestions of a rock weathering "memory effect" that extends the MIF-S record well after atmospheric oxygenation. Here we apply sulphur isotope analysis of diagenetic sulphides combined with U-Pb and Re-Os geochronology to provide the first extended record of sulphur cycle evolution in Western Australia spanning the GOE. Our data indicate that, from ~2.45 Gyr to beyond 2.31 Gyr, MIF-S was preserved in sulphides punctuated by several episodes of MIF-S disappearance concurrent with mass dependent sulphur isotope fractionations.

These results establish the MIF-S record as asynchronous between South Africa, North America and Australia, argue for regional- or continental-scale modulation of MIF-S memory effects due to oxidative weathering after the onset of the GOE, and suggest that the current paradigm of placing the GOE at 2.33-2.32 Ga based on the last occurrence of MIF-S should be abandoned.

**Mots-Clés:** Oxygénation de l’atmosphère terrestre, paleoprotérozoïque, isotope du soufre, datation

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: pascal.philippot@umontpellier.fr

## Quadruple sulfur isotope records of the Moodies Group (3.2 Ga), Barberton Greenstone Belt, South Africa

Masafumi Saitoh <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Johanna Marin-Carbonne <sup>1</sup>, Nicolas Olivier <sup>2</sup>, Christophe Thomazo <sup>3</sup>, Yuichiro Ueno <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) – Université Jean Monnet - Saint-Etienne – France

<sup>2</sup> Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) – Université Clermont Auvergne – France

<sup>3</sup> Laboratoire Biogéosciences – Université de Bourgogne – France

<sup>4</sup> Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Tech – Japon

To decipher the sulfur cycle on the early Archean Earth, quadruple sulfur isotopic compositions of the sedimentary rocks in the Moodies Group (ca. 3.2 Ga) in the Barberton Greenstone Belt (BGB), South Africa, were analyzed. The samples were collected from the Saddleback Syncline in the central part of the BGB on the eastern Kaapvaal Craton. The analyzed rocks are quartzitic sandstone and are mainly composed of medium- to fine-sand of quartz and K-feldspar. Quartz cements are frequently recognized in the rocks and suggest early-stage silicification after deposition. Muscovite/sericite is recognized mainly on the grain boundaries and implies hydrothermal alteration of K-feldspar. The analyzed sandstones also contain minor amounts of rutile and sulfide minerals. Moreover, microbial induced sedimentary structure (MISS) is frequently observed in the rocks. The  $\delta^{34}\text{S}$  values of the sulfides in the sandstones are almost consistently around +2.0 per mil, whereas the  $\Delta^{33}\text{S}$  values range from +0.05 to +0.25 per mil. The present  $\Delta^{33}\text{S}$  values are small compared to the previously reported values in the early Archean rocks, but still show significant mass independent isotopic fractionation (MIF) of sulfur. Moreover, the  $\Delta^{33}\text{S}$ - $\Delta^{36}\text{S}$  cross plot demonstrates that the present sulfur isotope data are largely on the 'Archean reference array' (ARA). Despite the substantial secondary metasomatisms by fluid circulation, the analyzed rocks in the Moodies Group partly record the early Archean sulfur cycle including photochemistry of sulfur in the reducing atmosphere.

**Mots-Clés:** Archean, sulfur, isotope

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>†</sup>Auteur correspondant: saitoh.m.ab@gmail.com

## Paired carbon isotope data from the 2.94 Ga Red Lake carbonate platform, Ontario, Canada

Pierre Sans Jofre <sup>\*1</sup>, Martin Homann <sup>2</sup>, Munira Afroz , Oanez Lebeau , Philip Fralick , Stefan Lalonde <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Brest (UBO) – UMR 6538 LGO, IUEM-UBO – France

<sup>2</sup> European Institute for Marine Studies, CNRS-UMR6538 Laboratoire Géosciences Océan – Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), UMR 6538 LGO, IUEM-UBO – France

<sup>3</sup> Laboratoire Géosciences Océan, IUEM, UBO, 29280 Plouzané, France. (LDO) – 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 – France

The first thick occurrence of carbonate known in Earth history was deposited 2.94 Ga ago in the Red Lake region, Northern Ontario, Canada. This deposit should provide important insight into early evolution of the global carbon cycle as well as early metabolic drivers of carbonate precipitation on Earth. Paired carbon isotope data ( $d^{13}\text{C}_{\text{carb}} - d^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ) have been shown to be a powerful tracer for understanding carbon sources and cycling in ancient environments, however few such data exist for Archean carbonate platforms. Here we present over 100 paired carbon isotope data from diverse facies of the Red Lake platform, including dolomitic domal stromatolites, crystal fans, and crinkly crusts, as well as calcitic sands and calcitic stromatolites. Samples were obtained from multiple industry drill core as well as field sampling. Backpack drill coring was also performed in the field to better correlate core samples with sedimentary features recognizable in the field, including one drill core piercing multiple crystal fan layers and a domal stromatolite. Carbonate C and O isotope compositions are consistent with precipitation from Archean seawater. Carbonate C isotopes, however, do show some variation between facies, with lighter values in deeper water facies. Organic carbon isotopes show a significant range, with values spanning from -30 to as heavy as -10 permil. The statistical distribution of organic carbon isotope data appears to suggest different organic carbon sources in near-shore carbonate-dominated environments versus off-shore cherty or shaly environments. A diagenetic origin of this signal appears unlikely based on C- and O- isotope systematics. Collectively, this data indicates that 2.94 Ga ago, carbon fixation pathways other than the Calvin-Benson cycle may have dominated shallow-water environments at the dawn of Earth's carbonate factory.

**Mots-Clés:** Paired carbon isotope, Archean carbonate platform, carbon cycle

<sup>\*</sup>Intervenant

## A Mo isotope challenge for oxidative Mn cycling during the Great Oxidation Event

Marie Thoby <sup>\*ψ1</sup>, Tyler Warchola <sup>2</sup>, Pascal Philippot <sup>3,4</sup>, Bryan Killingsworth <sup>1</sup>, Md. Samrat Alam <sup>2</sup>, Daniel S. Alessi <sup>2</sup>, Christophe Thomazo <sup>5</sup>, Magali Ader <sup>3</sup>, Kurt O. Konhauser <sup>2</sup>, Stefan V. Lalonde <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géosciences Océan - Université de Bretagne Occidentale (LGO - UBO) – Université de Bretagne Occidentale [UBO], Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), CNRS : UMR6538 – France

<sup>2</sup> Earth and Atmospheric Sciences - University of Alberta (EAS - UoA) – Canada

<sup>3</sup> Institut de Physique du globe de Paris (IPGP) – IPG PARIS – France

<sup>4</sup> Géosciences Montpellier, Université de Montpellier – Université Montpellier I, CNRS : UMR5243 – France

<sup>5</sup> Biogéosciences, Université de Bourgogne Franche-Comté – Université de Bourgogne-Franche-Comté, CNRS : UMR6282 – France

Manganese (Mn) enrichments in sedimentary rocks deposited around the Great Oxidation Event (GOE) ca. 2.5 – 2.3 Ga have been used as a proxy for the evolution of oxygen in the atmosphere and the evidence for Mn(II)-based phototrophy. Mn(II)-bearing minerals in zones of Mn enrichment are generally assumed to be the result of diagenetic reduction of primary Mn(IV) oxyhydroxides, however primary enrichment of Mn(II) from seawater is also a possibility, as occurs in certain anoxic basins today. Here we investigate Mn excursions associated with marine carbonates and shales from the 2.45 to < 2.31 Ga Turee Creek Group, Western Australia, that were sampled in drill core as part of the Turee Creek Drilling Project (TCDP). We examined Mo isotopic compositions across Mn enrichment zones, as the former presence of Mn(IV) oxides should result in light Mo isotope enrichment in the sediment. Mo isotope compositions indicate oxidative cycling of Mo in the global ocean. However, together with complementary petrography and trace element data, our results suggest that Mn was likely deposited as a Mn(II) carbonate that precipitated directly from the water column. Our results provide new insights on marine Mn cycling and water column redox around GOE time and draw into question the necessity of Mn(II)-based phototrophy as a driver of sedimentary Mn enrichment prior to the GOE.

**Mots-Clés:** Molybdenum isotopes, Manganese, Great Oxidation Event, Turee Creek

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: marie.thoby@univ-brest.fr

### **3.4. Extinctions de masse : des observations aux mécanismes**

## Multiple sulfur isotope signals associated with the end-Permian mass extinction recovery

Christophe Thomazo <sup>\*ψ1</sup>, Sofia El Meknassi <sup>3</sup>, Arnaud Brayard <sup>1</sup>, Emmanuelle Vennin <sup>4</sup>,  
 Nicolas Olivier <sup>5</sup>, Gilles Escarguel <sup>6</sup>, Kevin Bylund <sup>7</sup>, Jim Jenks <sup>8</sup>, Daniel Stephen <sup>9</sup>, Emmanuel Fara <sup>10</sup>,  
 Pierre Sans Jofre <sup>11</sup>, Bryan Killingsworth <sup>11</sup>, Pierre Cartigny <sup>12</sup>

<sup>1</sup> Biogéosciences – Université de Bourgogne, CNRS : UMR6282 – 6 Bvd Gabriel 21000 DIJON, France

<sup>3</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – IRD, Université Paul Sabatier - Toulouse 3, Observatoire Midi-Pyrénées, CNRS : UMR5563 – France

<sup>5</sup> Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) – Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II: UMR6524

<sup>6</sup> UMR CNRS 5023 Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystème Naturels et Anthropisés (LEHNA) – CNRS : UMR5023,  
 Université Claude Bernard - Lyon I -France

<sup>7</sup> Department of Earth Science – Utah Valley University, 800 West University Parkway, Orem, Utah 84058, USA

<sup>8</sup> 1134 Johnson Ridge Lane, West Jordan – Utah 84084, USA., États-Unis

<sup>9</sup> Department of Earth Science – Utah Valley University, 800 West University Parkway, Orem, Utah 84058, USA

<sup>10</sup> UMR CNRS 6282 Biogéosciences – CNRS : UMR6282, Université de Bourgogne – 21000 Dijon, France

<sup>11</sup> Université de Brest (UBO) – UMR 6538 LGO, IUEM-UBO – France

<sup>12</sup> Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) IPG PARIS, CNRS : UMR7154

The Early Triassic is generally portrayed as a time of high ecological stress leading to a delayed biotic recovery in the aftermath of the devastating end-Permian mass extinction. This interval is also characterized by repeated large-scale fluctuations of the global carbon, nitrogen and sulfur cycles, associated with harsh marine conditions including a combination of ocean acidification, euxinia, extreme seawater temperatures and shifting productivity. These perturbations are documented during the Dienerian, the Late Smithian and at the Spathian-Anisian boundary. Evidence from various paleolatitudes suggest that sulfidic ( $H_2S$ -rich) conditions may have developed widely during the Early Triassic, possibly up to ultra shallow environments at some places [1]. However, the spatio-temporal extent of such redox swings in the equatorial Panthalassa Ocean remains poorly constrained. In order to explore palaeoceanographic redox changes and their potential influences on the biotic recovery, we analyzed multiple sulfur isotopes ( $^{32}S$ ,  $^{33}S$ ,  $^{34}S$ , and  $^{36}S$ ) for sedimentary pyrite and CAS-d $^{34}S$  from sections in the Sonoma Foreland Basin (western USA). We analyzed shallow waters sediments spanning the Smithian to Spathian interval. We report a 35‰ range of variation in d $^{34}Spy$  associated with positive and steady D $^{33}Spy$  and d $^{34}SCAS$  signals. We discuss these results in terms of redox chemistry changes during the Early Triassic, and especially for the Smithian-Spathian transition. [1] Wignall et al. (2016) Geol. Mag. 153, 316.

**Mots-Clés:** Multiple sulfur isotope, Trias

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: christophe.thomazo@u-bourgogne.fr



## **4. GEORISQUES ET REHABILITATION DES ECOSYSTEMES TERRESTRES**

## 4.1. Dégradation et réhabilitation des écosystèmes terrestres

## Evaluation de la qualité des milieux aquatiques par l'entomofaune bioindicateur, cas de la zone humide Oglat Ed Daïra, Naâma (sud ouest d'Algérie).

Djamel Brahimi \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> université Abou Bakr belkaïd Tlemcen Algérie – Algérie

Les insectes sont utilisés comme bio indicateurs, en raison de leur sensibilité aux conditions environnementales qui, du fait de ses particularités écologiques, donne des informations sur les caractéristiques des milieux terrestres et aquatiques. L'objectif de cette étude est de connaître et préciser l'entomofaune bio-indicateur de la qualité du milieu aquatique de la zone humide Oglat Ed Daira. Naâma (SW Algérie). L'étude mené dans la zone humide durant 05 mois d'échantillonnage de Janvier à Mai 2017, permis de recenser 31 espèces. L'ordre des Coléoptères est le plus représenté dans la zone d'étude avec 11 espèces suivi par l'ordre des Odonates avec six espèces, les Lépidoptères se classe en troisième rang avec cinq espèces suivi les Diptères avec 03 espèces. Les Héminoptères sont représentés avec deux espèces et deux familles, Les Orthoptères, Ephéméroptères, les hémiptères et les plécoptères chacun entre ils représentent une seule espèce. Les différents indicateurs utilisés, à savoir la richesse spécifique (31 espèces), l'indice de diversité (1.01bits) et l'équitabilité (0.56) montrent que ce milieu est caractérisé par une biodiversité faunistique importante. L'étude de la qualité hydro biologique des cours d'eau de ce site, apprécié par la méthode de l'IBGN a montré une qualité hydro biologique bonne avec une pollution modérée (IBGN =14). Cette pollution est précisément marqué par l'exigence des Ephéméroptères et la disparition des Plécoptères.

**Mots-Clés:** hydro biologique, entomofaune, bioindicateurs, zone humide, Naama

\*Intervenant

## Facteurs naturels et anthropiques de dégradation des sols sur roches granitiques dans la région nord-ouest d'Annaba (Algérie)

Menana Daif <sup>\*1</sup>, Ahmed Arafa <sup>†1</sup>

<sup>1</sup> LGRN Université de Annaba Algérie – Laboratoire de Géodynamique et ressources naturelles, Université de Annaba B.P.12 ; 23000, Algérie., Algérie

Au Nord Ouest de Annaba affleurent des roches magmatiques calco- alcalines miocènes dont des granitoïdes qui occupent une superficie de plus de 40 km<sup>2</sup>.

La nature et la structuration particulière de ces roches sont en étroit rapport avec les réserves en eau et la végétation. En effet les microgranites massifs, fracturés par des diaclases, ont un débit prismatique. Les prismes évoluent dans une altération en boules pour donner dans un stade ultime une arène. Cette dernière montre de haut en bas : un faible horizon humifère, un horizon de sables grossiers suivi d'une arène très riche en boules. L'absence d'horizon podzolique est souvent due à la grande perméabilité de l'arène qui ne favorise pas la concentration des complexes Al-Fe-Si.

L'analyse chimique de l'eau recueillie montre de grandes affinités avec la composition de la roche : riche en potassium et pauvre en calcium magnésium.

Le type de végétation est aussi très adapté à des milieux acides ainsi qu'aux contraintes climatiques. Sur ce terrain riche en SiO<sub>2</sub>, se développe un maquis à végétation acidophile caractérisée par:

- une strate arborée clairsemée composée principalement de chênes,
- une strate arbustive dense avec de nombreux buissons à feuilles souvent épineuses persistantes : arbousiers, genévrier, lianes.

- un niveau herbacé pauvre en espèces, on y trouve en particulier de la fougère aigle.

La nature de la roche mère, granitique, détermine le type de pédogenèse. La structure et la dureté conditionnent largement la vitesse de la dégradation. Quant à son chimisme, il est directement reflété dans celui du sol qui en dérive. Les sols étudiés, contenant l'association Fe, Si et Al, sont fersialitiques typiquement méditerranéens. La concentration en surface des oxydes de fer provoque très souvent leur rubéfaction. Un cycle de bio-rhéxistasie peut aisément s'y appliquer et il semble clair que, sans un couvert végétal, l'installation de tout sol soit exclue. L'analyse de ces sols, en très grande partie fossiles, a pour objectif :

- de mettre en valeur leurs particularités,
- de mieux préciser leur vulnérabilité, et de proposer quelques stratégies pour leur protection et valorisation.

**Mots-Clés:** sols, arénisation, interaction roche, eau, vulnérabilité, protection, valorisation.

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>†</sup>Auteur correspondant: medarafa@yahoo.fr

## Intérêt des phytotechnologies pour gérer une friche de la carbochimie : exemple de Mazingarbe

Francis Douay <sup>\*1</sup>, Guillaume Lemoine <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Génie Civil géoEnvironnement (LGCgE), établissement ISA Yncréa Hauts-de-France, 48 Boulevard Vauban, 59046 Lille Cedex

<sup>2</sup> Etablissement Public Foncier Nord - Pas de Calais, 594 avenue Willy Brandt, CS 20003, 59777 Euralille Cedex

L'ancien Bassin minier du Nord - Pas de Calais présente de nombreux stigmates de l'industrie carbochimique qui s'y est développée dès la fin du 19<sup>e</sup> siècle pour valoriser les sous-produits de la cokéfaction. Les friches industrielles témoignent de ces activités passées et, à ce jour, leur requalification est un enjeu en termes de gestion des sites et sols pollués. Outre la limitation des dangers environnementaux et sanitaires, cette requalification peut contribuer à limiter l'étalement urbain via la réaffectation de ces espaces susceptibles d'accueillir des logements, activités économiques et espaces verts ou naturels, ces derniers participant à l'effort collectif visant à créer une trame verte dans un territoire fortement déficitaire en espaces de nature. Parmi les techniques de requalification des sols pollués, les phytotechnologies, basées sur l'utilisation *in situ* d'espèces végétales, pour contenir, extraire ou dégrader des polluants inorganiques ou organiques, sont bien perçues par les acteurs et les populations concernés mais restent encore émergeantes sur le marché de la dépollution notamment du fait du manque de recul opérationnel. De plus, l'hétérogénéité des paramètres physico-chimiques des sols de friches industrielles, leurs potentialités agronomiques médiocres et leurs multi-contaminations peuvent constituer de fortes contraintes dans le cadre d'une opération de restauration.

L'exemple présenté s'inscrit dans le cadre d'une démarche pluridisciplinaire, soutenue par l'ADEME et associant des universitaires, des institutionnels, des bureaux d'études et des opérateurs privés. Le programme, nommé MisChar, porte notamment sur une friche industrielle située au pied du terril 49 de la fosse 3 à Mazingarbe. Il s'agit d'un ancien bassin de décantation, d'une surface de l'ordre de 2 000 m<sup>2</sup>, où ont été déposées dans les années 1960 des boues multi-contaminées issues des industries plastiques installées sur le site de la Grande Paroisse. Préalablement aux travaux débutés à l'automne 2017 pour la mise en place des expérimentations, le bassin était caractérisé par une strate muscinale très importante et une strate arbustive haute à Sureau noir (*Sambucus nigra*). La strate herbacée était composée quasi exclusivement de Berce du Caucase (*Heracleum mantegazzianum*).

La démarche développée sur ce site vise à étudier différents modes de gestion reposant sur une utilisation d'espèces herbacées associées ou pas à un amendement (mélange de charbon végétal et d'un compost). Sont évalués les effets de ces techniques sur la fonctionnalité des sols, le comportement des polluants, la biodiversité et les risques sanitaires. Sont également pris en compte les perceptions des acteurs locaux et les aspects économiques des modes de gestion étudiés. Avec la mise en place d'un démonstrateur, il s'agit *in fine* de développer des compétences et des filières de valorisation des espaces dégradés en réponse aux attentes des populations concernées et des acteurs économiques.

**Mots clés :** cadmium, mercure, hydrocarbures, phytostabilisation, rhizodégradation, corridor écologique, renaturation

## Apport de l'agriculture urbaine dans une démarche de requalification de friches contaminées en jardin collectif : évaluation des sols et impacts environnementaux associés

Arnaud Gauthier <sup>\*ψ</sup><sup>1</sup>, Justine Masse <sup>\*1</sup>, Mikael Motelica-Heino <sup>2</sup>, Clémence Dubois <sup>1</sup>, Michel Dubois <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) - EA 4515 (LGCgE) – Université de Lille – France

<sup>2</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO) – 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

Le concept d'agriculture urbaine repose sur la nécessité de faire tomber les barrières entre les zones de production et de consommation. L'agriculture urbaine permet également de valoriser des terres inutilisées, ou qui ont été abandonnées au profit d'espaces plus grands en périphérie. Enfin, cette agriculture est une solution pour recycler un certain nombre de déchets organiques produits dans les villes et qui peuvent donc être valorisés comme nouvel engrais ou substrat pour les cultures. Ce projet s'inscrit dans une démarche sociétale visant à mettre en place un système de production agricole et écologique en zone urbaine, dans un quartier populaire près de Lille (Nord de la France). Scientifiquement, la démarche porte sur la compréhension des mécanismes de transfert et d'accessibilité des polluants du sol aux plantes. L'objectif de ce projet est ainsi de déterminer dans quelles mesures il est possible de redonner au substrat sol son sens premier de support de culture et de suivre l'évolution des contaminants métalliques (Pb, As, Cd, Zn) ou organiques (Hydrocarbures, PCB) vers les parties comestibles des plantes. Pour cela, un "Jardin Ressource" a été aménagé dans le quartier de Fives à l'est de Lille pour permettre aux personnes le souhaitant de créer leur propre espace de culture. Une caractérisation initiale du site a été menée tant sur le plan chimique que physique, associée à un suivi des concentrations en certains polluants dans les végétaux. Les premiers résultats montrent des concentrations relativement importantes en plomb (330 mg kg<sup>-1</sup>), zinc (290 mg kg<sup>-1</sup>) et chrome (52 mg kg<sup>-1</sup>) dans certains endroits du site. Les analyses effectuées sur le compost produit à partir des déchets verts collectés sur le site n'ont pas mis en évidence de contamination par des éléments traces métalliques. Les résultats des analyses réalisées sur des prélevements de cultures maraîchères (pois, laitue, radis) ont montré une production de biomasse légèrement inférieure à celle obtenue dans un sol témoin ; les concentrations en métaux étant quant à elles conformes aux normes en vigueur.

**Mots-Clés:** Jardin ressource, nouvelles pratiques agricoles, contaminant métalliques et organiques, transferts, risques alimentaires

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: Arnaud.Gauthier@univ-lille.fr

## Cartographie et traçage magnétique de la pollution métallique des sédiments fluviatiles parisiens

Aude Isambert <sup>\*1</sup>, Christine Franke <sup>2</sup>, Yuyin Wu <sup>3</sup>, Mélina Macouin <sup>4</sup>, Sonia Rousse <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institut de Physique du Globe de Paris, Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, 1 rue Jussieu, F-75238 Paris Cedex 05 – CNRS : UMR7154 – France

<sup>2</sup> MINES ParisTech, PSL Research University, Centre de Géosciences, 35 rue St Honoré, 77305

Fontainebleau Cedex, France – Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique – France

<sup>3</sup> Institut de Physique du Globe de Paris, Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, 1 rue Jussieu, F-75238 Paris Cedex 05 – UMR 7154 – France

<sup>4</sup> Geosciences Environnement Toulouse, UR234 IRD, Université Paul Sabatier, Toulouse – CNRS : UMR5563 – France

La nature des sédiments des fleuves urbains est directement liée à ses multiples sources d'apports, que ceux-ci soient naturels (liés aux apports détritiques dus au phénomène d'érosion/déposition) ou anthropiques. Des études récentes montrent que l'impact du trafic automobile sur l'environnement, associé aux autres sources anthropiques (usines, métallurgie, poussières urbaines, ruissellement, eaux usées, etc) est accompagné d'émissions significatives de particules riches en fer, fortement magnétiques. La présence de ces minéraux magnétiques est souvent associée à de fortes concentrations en métaux lourds. Les mesures magnétiques représentent une méthode particulièrement adaptée pour déterminer la distribution spatiale et temporelle de la pollution métallique et mieux contraindre ses sources.

Dans le cadre du projet " Paris 2030 ", plusieurs campagnes de prélèvement de sédiments fluviatiles ont été effectuées d'amont en aval de l'agglomération parisienne. Les échantillons ont été analysés à l'aide des techniques dédiées au magnétisme environnemental (susceptibilité et hystérésis magnétique, dépendance en fréquence de la susceptibilité). L'étude de ces différents paramètres fournit de précieuses indications sur la concentration, la granulométrie et la nature des (nano)particules métalliques présentes dans les sédiments. Les résultats obtenus montrent une augmentation de la concentration en particules magnétiques d'amont en aval, comme précédemment observé au niveau des matières en suspension dans l'étude de Franke et al. (2009) et Kayvantash (2016).

En complément, des analyses géochimiques ont été effectuées pour déterminer la composition élémentaire des sédiments, et vérifier la corrélation des teneurs en fer et en métaux lourds avec les paramètres magnétiques. Les résultats obtenus confortent l'hypothèse d'une origine anthropique responsable de l'augmentation du signal magnétique, qui viendrait s'ajouter aux sources naturelles détritiques ou biologiques.

Franke, C., Kissel, C., Robin, E., Bonté, P., & Lagroix, F. (2009). Magnetic particle characterization in the Seine river system: Implications for the determination of natural versus anthropogenic input. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10 (8).

Kayvantash, D. (2016), Caractérisation des particules ferrugineuses dans la Seine avec le magnétisme environnemental, thèse doctorale PSL Research University, MINES ParisTech/LSCE. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01699335v1>

**Mots-Clés:** pollution métallique, magnétisme environnemental, cartographie magnétique, sédiments fluviatiles, Seine

<sup>\*</sup>Intervenant

## Les données de télédétection optique et radar pour l'évaluation et le suivi des écosystèmes forestiers tropicaux : étude de cas au Togo, en Guyane française et en République Dominicaine

Anoumou Kemavo <sup>\*1</sup>, Abdourrahmane Atto , Cédric Lardeux , Martin Rapilly , Jean-Paul Rudant <sup>\*ψ</sup>

<sup>1</sup> Universite Paris-Est Marne-la-Vallée (UPEMLV) – Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne (UPEC) – France

Cette présentation propose d'explorer les potentialités des données de télédétection optique et radar libre d'accès pour la cartographie des classes d'occupation des sols dans les écosystèmes forestiers tropicaux, aux climats secs ou humides. L'analyse a porté sur la caractérisation des changements dans les strates d'occupation des sols et sur le suivi temporel des strates fragiles et vulnérables (forêts, mangroves). Différents sites tests situés dans ces écosystèmes ont été sélectionnés. Il s'agit de la réserve de biosphère de l'Oti-Keran-Mandourie (OKM) située dans la région des savanes au Togo, la zone située autour du pont faisant la liaison entre la ville de Saint-Georges de l'Oyapock en Guyane française et l'état d'Amapa au Brésil et la province de la Monté Cristi en république Dominicaine. Concernant les données de télédétection utilisées : pour les images radar, des séries temporelles Sentinel-1, des mosaïques Alos-2 et, pour les images optiques, Sentinel-2 et Landsat-8. D'autres données annexes ont également été utilisées : cartes d'occupation du sol, points GPS collectés lors des missions de terrain, modèles numériques de terrain (MNT-SRTM de 30m) ainsi que les données d'inventaires forestiers nationaux lorsque ceux-ci étaient disponibles. Notre approche a comporté des prétraitements réalisés sur les images optiques et radar de tous les sites accompagnés de traitements spécifiques sur chacun des sites. Les images optiques ont donné lieu à une fusion dite pan-chromatique (fusion des bandes panchromatiques les mieux résolues (taille de pixel de 10 m pour Sentinel-2 et 15 m pour Land- sat) avec les bandes spectrales les moins résolues). Pour les images radar sentinel-1, les étapes successives de prétraitement, ont été l'ortho-rectification basée sur un MNT SRTM, la calibration radiométrique et le filtrage spatio-temporel de Quegan. Les approches spécifiques, variables selon le site d'étude, ont comporté : la classification supervisée Random Forest (RF), une détection automatique de changements basée sur la décomposition en ondelette, une approche d'analyse diachronique par seuillage sur les classes de mangroves et de forêts. Les principaux résultats sont les suivants : Site de l'OKM : une classification menée sur une combinaison d'images optiques et radar donne de meilleures performances que des classifications menées sur des images optiques et radar considérées séparément. Sur le site de Saint-Georges de l'Oyapock, l'analyse temporelle menée à partir de décompositions en ondelettes, a permis de détecter trois grands types de changements : déforestation anthropique, évolutions saisonnières, impacts des pratiques agricoles. Sur le site de la province de Monté Cristi, l'analyse conjointe d'images radar et optiques a permis de proposer une cartographie comportant 18 classes d'occupation des sols, contrôlées sur le terrain avec une précision globale de plus de 90 %. Le suivi historique des forêts et des mangroves montre une régression de la couvert des deux strates.

**Mots-Clés:** Sentinel, 1 et 2, Landsat, pan, chromatique, filtrage spatio, temporel, classification supervisée Random Forest (RF)

## Modélisation de la productivité des écosystèmes et des caractéristiques des sols après exploitation minière. Exemple de la reconstruction des sols après l'exploitation des sables bitumineux (Nord Alberta, Canada)

Emily Lloret<sup>\*1</sup>, Nilusha Welegedara<sup>2</sup>, Sylvie A. Quideau<sup>2</sup>, et Robert Grant<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement - Université de Lille, France

<sup>2</sup>Department of Renewable Resources, University of Alberta, Edmonton, AB, Canada

La réussite du développement d'un écosystème sur des reliefs reconstruits avec des matériaux stériles, en particulier les déchets miniers, est liée aux caractéristiques de la couverture pédologique. La reconstruction des sols après exploitation des sables bitumineux du nord de l'Alberta en est un bon exemple. En effet, une fois la ressource extraite, les industries sont dans l'obligation de restaurer les paysages perturbés.

Le développement de la biomasse, la croissance des arbres, la profondeur d'enracinement, la surface foliaire, les cycles du carbone et de l'azote jouent chacun un rôle important dans la restauration de la productivité des écosystèmes. Pour examiner ces rôles, nous avons comparé les effets modélisés et mesurés de différentes épaisseurs de couvertures pédologiques reconstruites (mixtes sols tourbeux-minéraux) sur la productivité des écosystèmes et la qualité des sols sur le site de South Hills de la mine Syncrude, dans le nord de l'Alberta (Canada). Ce site d'étude est un site reconstruit avec une forêt âgée de 17 ans sur une colline de morts-terrains salés, recouverts d'un sol de couverture de trois épaisseurs différentes (35, 50, 100 cm) et plantés de peupliers faux-tremble et d'épinettes blanches.

L'humidité du sol, l'utilisation de l'eau par les arbres et la productivité modélisées en réponse à l'épaisseur du sol reconstruit ont suivi les mêmes tendances que les mesures de terrain. Le modèle simule correctement l'absorption d'eau, la transpiration, le flux de CO<sub>2</sub> et, par conséquent, la quantité de biomasse (plantes) entre 2011 et 2015, et indique une baisse de la disponibilité en eau dans les zones peu profondes. La transpiration augmente de façon non linéaire avec l'augmentation de l'épaisseur du sol de couverture, indiquant une profondeur de seuil au-dessus de laquelle les gains de productivité sont limités. Le modèle simulait clairement moins d'absorption d'eau par les plantes et moins de productivité, en particulier en haut de pente pendant les années les plus sèches. La croissance des trembles, à la fois mesurée et modélisée, tendait à augmenter avec l'épaisseur du sol de couverture, tandis que la croissance de l'épinette blanche ne semblait pas influencée. Cette étude démontre l'importance de l'épaisseur du sol de couverture en tant que modulateur de l'humidité disponible dans le sol. Il a également été démontré qu'un modèle mécanistique tel que ecosys peut être un outil très utile pour prédire les schémas de productivité primaire nette sur des sols reconstruits.

**Mots clés :** reconstruction de sol, production des écosystèmes, caractéristiques des sols, modèle ecosys

## Caractérisation de la disponibilité environnementale et toxicologique de Cd et Pb dans des anthroposols issus de sédiments de dragage fluviaux

Van Xuan Nguyen <sup>\*1</sup>, Francis Douay <sup>ψ1</sup> Claire Alary <sup>φ2</sup>, Yannick Mamindy-Pajany <sup>§2</sup>,  
Aurélie Pelfrène <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Yncrea-ISA - LGCgE - France

<sup>2</sup> Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai (IMT Lille Douai) - LGCgE - France

La gestion des sédiments fluviaux est une problématique grandissante dans les régions sensibles à l'érosion hydrique des sols comme dans le Nord de la France. Les opérations de dragage des voies navigables, rendues nécessaires pour maintenir la navigation et limiter les inondations, engendrent des quantités considérables de sédiments. En 2007, Voies Navigables de France évaluaient les quantités à extraire à 10 millions de m<sup>3</sup> jusqu'en 2027. Or, ces sédiments intègrent, à des degrés très variables, des contaminants inorganiques et organiques d'origines complexes (agricoles, domestiques, urbaines et industrielles). Du fait des quantités et de leurs degrés de contamination, la solution la plus souvent retenue, ces cinquante dernières années, reste la mise en dépôt de ces sédiments. A ce jour, la surface des 183 sites de gestion recensés représente environ 1 600 ha dans les départements du Nord et du Pas de Calais. Une fois déposés à terre, les sédiments subissent des processus d'oxydation et évoluent tel un néosol sur lequel se met souvent en place une végétation spontanée dès les premières années. Ces sites de dépôts peuvent être des éléments d'une trame verte et un réservoir foncier à reconquérir à condition de maîtriser les risques environnementaux et sanitaires selon les usages envisagés. A ces fins, la caractérisation physico-chimique de ces anthroposols s'avère nécessaire. Pour améliorer les connaissances et préciser les risques induits par ces dépôts, douze sites de gestion répartis dans différents contextes environnementaux de la région ont été sélectionnés sur la base de leur contamination métallique. Une reconnaissance préliminaire et une analyse statistique ont été menées sur 169 échantillons de surface. Les données acquises ont conduit à sélectionner 69 échantillons présentant des paramètres physico-chimiques contrastés représentatifs de la population initiale. La disponibilité environnementale et toxicologique des polluants métalliques mesurée dans ces échantillons a été confrontée à leurs paramètres physico-chimiques. Les premiers résultats obtenus seront présentés et discutés.

**Mots-Clés:** sédiments fluviaux, anthroposols, disponibilité environnementale, bioaccessibilité orale

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: francis.douay@yncrea.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: claire.alary@imt-lille-douai.fr

<sup>§</sup>Auteur correspondant: yannick.mamindy@imt-lille-douai.fr

<sup>†</sup>Auteur correspondant: aurelie.pelfrene@yncrea.fr

## Isotopes du plomb et caractérisation de la contamination de sédiments de rivière au voisinage de fonderies historiques: cas du canal de la Deûle (Région Haut de France)

Sylvie Philippe <sup>\*1</sup>, Claire Alary <sup>2</sup>, Wolfgang Dörr <sup>3</sup>, Baghdad Ouddane <sup>4</sup>, Lucie Courcot <sup>1</sup>,  
Jacinthe Caillaud <sup>1</sup>, Gabriel Billon <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences - UMR 8187 (LOG) - ULCO, Univ de Lille, Centre CNRS - France

<sup>2</sup> Département Génie Civil et Environnemental (EA 4515 - LGCgE) - IMT Lille Douai, 941 rue Charles Bourseul, CS 10838, 59508 Douai Cédex, Université de Lille - France

<sup>3</sup> Institut für Geowissenschaften, Goethe Universität (IGL - U. Francfort) - Allemagne

<sup>4</sup> Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et Raman - UMR 8516 (LASIR) - Université de Lille, CNRS - France

En l'absence de remédiation, les contaminations métalliques à caractère historique persistent dans les sols et sédiments et constituent une menace pour les écosystèmes et la santé des populations. A partir de la fin du XIX siècle, et ceci durant plusieurs décennies, la région de Noyelles-Godault et Auby a été soumise à des émissions par voie atmosphérique de Pb, Zn et Cd liées à l'activité de deux sites de fonderie. La première, connue actuellement sous le nom de Metaleurop (ME), a été fermée en 2003, la seconde, actuellement nommée Nystar-Umicore (UM), a, en 1975, changé son process de production, moins émetteur de poussières. Le canal de la Deûle fortement anthropisé longe ces deux sites industriels, ME se situant en aval de UM. Réceptacle des émissions de poussières et des apports de contaminants lors du déchargeement du minerai par exemple, cette voie d'eau fait l'objet de curages réguliers.

En 2002, soit un an avant l'arrêt de l'un des deux sites, une campagne de prélèvements de sédiments de surface de la Deûle a été réalisée sur une portion d'environ 10 km couvrant la zone affectée par les retombées de contaminants. L'analyse isotopique du plomb a été réalisée sur la fraction extraite des sédiments (< 2 mm) par un mélange HCl/HNO<sub>3</sub> (Graney et al., 1995).

Les rapports isotopiques du plomb ( $17,62 < ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 17,81$ ) ainsi obtenus sur les sédiments confirment, en accord avec les données de Franssens et al. (2004), l'impact majeur de l'activité "récente" (datant de la période de prélèvement) de ME dans la portion du canal proche de l'usine et en aval de celle-ci (min. 2 km). L'influence des émissions historiques y est en revanche peu marquée. Sur la quasi-totalité du reste du transect, cette empreinte d'origine "récente" est présente mais cependant plus réduite comme le montre une dispersion plus large des rapports isotopiques ( $16,85 < ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 18,25$ ).

Le recoupement de ces valeurs avec les teneurs en Pb et les données de la littérature permet de proposer la participation de sources de contamination, autres que les apports liés à ME datant de la période de prélèvement. Ainsi, des apports de plomb en lien avec l'activité récente de l'usine UM sont envisagés. De même, les sols ayant intégré, sur plusieurs décennies, les retombées de contaminants issus des deux usines ont pu être des pourvoyeurs de métaux par le biais du ruissellement. Enfin, le caractère radiogénique du plomb de certains sédiments laisse supposer la contribution d'une ancienne cokerie. Ainsi, la contamination historique affecte donc directement ou indirectement, par le biais du ruissellement sur des sols contaminés, les sédiments du canal de la Deûle.

**Mots-Clés:** Isotopes du Pb, sédiments fluviaux, contamination, fonderies, minerais

## **4.2. Rôle des végétaux sur la dynamique et la disponibilité des éléments chimiques**

## Role of aquatic macrophytes on iron-phosphorus interactions

Pierre Anschutz <sup>\*1</sup>, Céline Charbonnier <sup>1</sup>, Christian Chauvin <sup>2</sup>, Juliette Rosebery <sup>2</sup>, Gwilherm Jan <sup>2</sup>,  
Dominique Poirier <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Bordeaux (UMR EPOC) – Université de Bordeaux-CNRS – France

<sup>2</sup> Irstea - Centre de Bordeaux – Irstea – France

<sup>3</sup> UMR EPOC – Université de Bordeaux (Bordeaux, France) – France

Knowledge on phosphorus (P) and nitrogen (N) cycles is vital to resolve or prevent eutrophication problems. One of the practice suggested for P and N retention is the use of vegetated ditches and artificial wetlands, which have been demonstrated to remove large proportion of nutrient through plant uptake, sedimentation and transformation. Despite the numerous literature on nutrient removal, previous studies have rarely considered the indirect role of plant on iron-geochemistry. Indeed, coupling between iron (Fe) and P geochemistry is one of the main processes that control P availability in aquatic system. One of the aspect that remains to be addressed is how plants may influence Fe geochemistry, and therefore, the speciation of P. This has been extensively studied in marine seagrasses rhizosphere and in soil science, but interactions between plant activity and Fe-P coupling in the surface freshwater is poorly documented. The objective of our study is to gain better insight into complex interactions between macrophytes and Fe and P geochemistry in the Leyre watershed. For that, we have monitored the evolution of geochemical, physical, and vegetal parameters during the day-night cycle in streams colonized by different communities of plants, from the headwater part of the drainage basin. We have selected streams that drain pine forest and crop fields, which are the two main land use of the Leyre catchment (83 and 14%, respectively). We show that freshwater aquatic macrophytes and associated biofilms are hotspots of sequestration of P as Fe-ox bound P due to increasing kinetics of dissolved Fe oxidation during photosynthetic activity. The increase in Fe oxidation is mainly due to increase in pH due to CO<sub>2</sub> uptake. At the Leyre-catchment scale, we observe that Fe-oxide is the main source of P for the Arcachon lagoon, the outlet of the river.

**Mots-Clés:** Biogeochemistry, phosphorus, iron, 24h cycles, eutrophication

\*Intervenant

## Evaluation de trois légumineuses arbustives tropicales dans la phytoremédiation des sols de décharge municipale pollués par les Éléments Traces Métalliques (ETM) dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire.

N'gattah Barthélémy Armel Kraidy <sup>\*ψ1</sup>, Bolou Emile Bolou-Bi <sup>φ 1</sup>, Thierry Philippe Guety <sup>§1</sup>,  
Jean Baptiste Ettien <sup>¶ 1</sup>

<sup>1</sup> Université Félix Houphouët-Boigny, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources minières, Département des Sciences du Sol, LIFBIOS – Côte d'Ivoire

La croissance de la population urbaine, en Côte d'Ivoire, entraîne la production d'une grande quantité de déchets municipaux. Ces déchets se retrouvent à terme dans des décharges municipales à ciel ouvert sans aucun tri. Ces déchets municipaux rapportent aux sols des décharges des concentrations en éléments traces métalliques (ETM) (ex. : Cr, Cd, Pb, Zn) suffisamment élevées pour constituer une réelle menace pour l'environnement et la santé humaine. En effet, ces décharges riches en matières organiques sont utilisées pour la production de légumes frais destinés aux marchés urbains d'Abidjan. De plus, les décharges sont situées dans des zones où l'on capte les eaux de nappes phréatiques servant à l'alimentation d'Abidjan. La dépollution des sols des décharges municipales devient donc un enjeu sociétal et économique pour la ville d'Abidjan. Face à l'inefficacité des solutions proposées à ce jour pour le traitement des décharges municipales, nous nous proposons de les réhabiliter par une méthode bien connue et peu onéreuse qu'est la phytoremédiation.

L'objectif de ce travail était donc d'évaluer la capacité de légumineuses arbustives à croissance rapide dans la phytoremédiation de sols de décharges municipales pollués par les Éléments Traces Métalliques (ETM). C'est dans ce cadre que nous avons réalisé en conditions contrôlées des cultures en pots de trois légumineuses arbustives (*Acacia mangium*, *Acacia auriculiformis* et *Acacia crassicarpa*), pendant six mois sur des sols d'une décharge municipale de Bonoua dans le Sud Est de la Côte d'Ivoire. Les résultats montrent une alcalinisation (pH : 8 -8,8) des lixiviats recueillis pour les différents traitements effectués (Sol de décharge + A.M, Sol de décharge + A.A., Sol de décharge + A.C.). En fin de culture, A.A. et A.M. présentent les hauteurs les plus élevées avec respectivement  $51,16 \pm 11,06$  cm et  $38,91 \pm 6,94$  cm alors que A.C présente une faible hauteur ( $17,41 \pm 1,01$  cm). *Acacia mangium* présente le plus grand nombre de phyllodes ( $40,68 \pm 29,7$ ) suivi de A.A. ( $29,33 \pm 9,01$ ) et A.C ( $4,6 \pm 1,15$ ). *Acacia auriculiformis* et A.M présentent respectivement les biomasses aériennes sèches de  $3,53 \pm 1,25$  mg et  $3,35 \pm 0,98$  mg alors que A.C a une faible biomasse aérienne sèche de  $0,74 \pm 0,26$  mg. Au niveau de la biomasse racinaire également, A.A. et A.M. présentent les valeurs les plus élevées avec respectivement  $0,81 \pm 0,42$  mg et  $0,67 \pm 0,03$  mg alors que A.C présente une biomasse de  $0,19 \pm 0,15$  mg. *Acacia auriculiformis* et A.M. semblent être les deux arbustes les mieux adaptés sur des sols pollués. La détermination de l'arbuste le plus efficient dans la mobilisation des ETM se fera sur la base des teneurs en ETM (Cr, Cd, Pb, Zn) prélevées des sols par les arbustes. Ces teneurs en ETM sont en cours d'analyse et les résultats seront présentés et discutés en comparant les arbustes entre eux.

**Mots-Clés:** Décharges municipales, sols, pollution, ETM, phytoremédiation, *Acacia*

## De l'intérêt de renseigner le pouvoir tampon du sol vis-à-vis du phosphore pour mieux appréhender l'effet de la fertilisation phosphatée sur le transfert sol-plante de l'arsenic

Jean-Yves Cornu <sup>\*1</sup>, Aissatou Youssouph Sow <sup>1</sup>, Alain Mollier <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Interactions Sol Plante Atmosphère (ISPA) – Institut National de la Recherche Agronomique : UMR1391, Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agronomiques de Bordeaux-Aquitaine – France

L'arsenic est un élément trace毒ique pour les êtres vivants qui contamine certains sols dont des sols agricoles. L'étude de son transfert du sol vers le compartiment végétal est indispensable à des fins de sécurité sanitaire et de dépollution. Ce projet s'intéresse à la fertilisation phosphatée comme levier agronomique pouvant moduler le transfert sol-plante de l'arsenic. La similarité chimique entre les ions phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) et arséniate ( $\text{AsO}_4^{3-}$ ) fait que ces deux ions se sorbent sur les mêmes sites des mêmes constituants du sol et que les ions arséniate sont internalisés par la racine végétale via les transporteurs de phosphate. La dynamique de l'arsenic est donc fortement impactée par la disponibilité de P à l'interface sol-plante, en conditions aérobie. Ce travail traite de l'intérêt de mesurer le pouvoir tampon du sol vis-à-vis de P pour mieux appréhender l'effet de la fertilisation phosphatée sur le transfert sol-plante de l'arsenic. Il vise à tester s'il existe un lien entre le pouvoir tampon du sol vis-à-vis de P et l'intensité avec laquelle un ajout de P affecte la dynamique d'As (mobilité, phytodisponibilité) à l'interface sol-plante. Ce travail s'appuie sur 5 sols de différentes origines et teneurs en As, présentant des textures, pH, et teneur en matière organique contrastés. Une première approche, en batch, a consisté à mettre ces sols en contact avec des doses croissantes de P afin d'évaluer leur pouvoir tampon vis-à-vis de P et de quantifier, pour chaque sol, l'effet de P sur la mobilité et la phytodisponibilité d'As. Cette première approche a permis de confirmer qu'un ajout de P augmentait de manière systématique la mobilité et la phytodisponibilité d'As dans les sols, quels que soit leur teneur initiale en As, en P et leur pouvoir tampon vis-à-vis de P. Un travail sur les données permettra de préciser le lien entre l'intensité de mobilisation d'As suite à un ajout de P et le pouvoir tampon du sol vis-à-vis de P.

Une seconde approche, en cours, vise à vérifier qu'une même dose de P permet, selon le pouvoir tampon du sol vis-à-vis de P, de promouvoir ou de freiner le transfert sol-plante d'As. Cette approche est conduite en pot de sol sur deux modèles végétaux, l'un hyperaccumulateur d'As (*Pteris vitata*) l'autre non (*Zea mays*).

Ce travail devrait permettre de préciser les niveaux de fourniture en P permettant de promouvoir ou de freiner le transfert sol-plante de l'arsenic, selon le contexte.

**Mots-Clés:** arsenic, sols agricoles, géochimie

\*Intervenant

## Phytomanagement of contaminated soils by potentially toxic metals in urban areas: a new approach combining sustainable amount of phosphates and ryegrass

Marie Hechelski <sup>\*ψ1</sup>, Brice Louvel <sup>1</sup>, Pierrick Dufrenoy <sup>2,3</sup>, Alina Ghinet <sup>2,4,5</sup>, Christophe Waterlot <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) - EA 4515 (LGCgE) – Yncréa Hauts-de-France – France

<sup>2</sup> Laboratoire de chimie durable et santé (YNCREA-HEI) – YNCREA Hauts de France, Yncréa  
Hauts-de-France – France

<sup>3</sup> Unité de Recherche en Chimie Organique et Macromoléculaire (URCOM) – Université Le Havre Normandie : EA3221, Université Le Havre Normandie : EA3221 – France

<sup>4</sup> Lille Inflammation Research International Center (LIRIC) – Yncréa Hauts-de-France, Institut Pasteur Lille : U995,  
Université Lille II - Droit et santé : EAU995 – France

<sup>5</sup> Faculty of chemistry "Alexandru Ioan Cuza" – Roumanie

Number of contaminated soils by potentially toxic metals results in a large part of human and industrial activities. Recent environmentally friendly advances have been emerged in the field of soil restoration. In that respect, a new approach combining sustainable amount of phosphates and ryegrass (*Lolium perenne* L.) was evaluated in a greenhouse experiment.

The aim of this study was to (i) reduce the environmental availability of carcinogenic metals (Cd and Pb) and (ii) promote the availability of microelements (Cu, Fe, Zn), alkali and alkali earth metals in the shoots of ryegrass in order to improve soil quality, to favor biodiversity and to use the produced biomass.

A kitchen contaminated garden soil (Cd: 20 mg kg<sup>-1</sup>; Pb: 1400 mg kg<sup>-1</sup>; Zn: 4000 mg kg<sup>-1</sup>) from northern France was treated with Ca(HPO)<sub>4</sub> or CaHPO. Amended soils were sown with ryegrass and two harvests of shoots were successively carried. It was highlighted (i) an increase of the extractable metals (e.g. Zn and Fe) in amended soil, (ii) an increase of the ratios Zn/Cd, Zn/Pb and Zn/Cu up to 168, 177 and 92 at the first harvest, and 208, 43 and 84 at the second harvest, (iii) a decrease of concentration of Cd and Pb (up to 20%) in the shoots of ryegrass. Moreover, the high concentrations of Zn (from 1050 to 2000 mg kg<sup>-1</sup> DW) measured in the ryegrass shoots from the first and the second harvests make them a potential biomass to produce biosourced catalysts in order to synthesize molecules of interest.

**Mots-Clés:** Metal, Nutrient, Soil, Phosphorus, Amendment, Ryegrass

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: marie.hechelski@yncrea.fr

## Sorption du cuivre et de quatre pesticides sur les sédiments et les racines de quatre espèces végétales d'un bassin de rétention en milieu viticole

Béatrice Marin <sup>\*1</sup>, Anne Caner-Chabran <sup>1</sup>, Sylvie Dousset <sup>2</sup>, Alexandra Conreux <sup>1</sup>, David Billet <sup>2</sup>

<sup>1</sup> GEGENAA EA 3795 – Université de Reims Champagne-Ardenne, France – France

<sup>2</sup> LIEC UMR CNRS 7360 – Université de Lorraine, France – France

Les fortes pentes du vignoble de Champagne favorisent les phénomènes de ruissellement et d'érosion et donc le transfert des intrants organiques et minéraux vers les eaux de surface. Pour gérer le ruissellement et préserver la qualité de l'eau, des bassins de rétention sont construits au bas des versants viticoles. Le bassin de rétention de Nogent-l'Abbesse (située à 10 km à l'est de Reims, Marne) réceptionne les eaux de ruissellement d'un bassin versant d'une surface totale de 335 ha dont 102 ha de vigne. D'un volume total de 28 000 m<sup>3</sup>, ce bassin comprend quatre modules dédiés à (1) la décantation, (2) la photodégradation, (3) la phytoremédiation et (4) l'infiltration. A chaque événement ruisselant, les concentrations en pesticides et en Cu sont déterminées dans les eaux à l'entrée et à la sortie de chaque module pour évaluer leur potentiel de remédiation respectif. Pour évaluer la contribution relative des différents processus de remédiation, des expériences complémentaires de cinétiques et isothermes d'adsorption ont été réalisées en laboratoire sur les sédiments des modules de photodégradation (module 2) et de phytoremédiation (module 3), ainsi que sur les racines des quatre espèces végétales plantées dans le module 3 (*Typha latifolia*, *Phragmites australis*, *Mentha aquatica*, *Iris pseudacorus*). Quatre contaminants organiques (cyazofamide, fludioxonil, fluopicolide, oryzalin) et un contaminant minéral (Cu) ont été sélectionnés sur la base de leurs propriétés physico-chimiques contrastées et de la quantité annuelle appliquée. Pour les expériences de cinétiques, 10 mL (CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol.L<sup>-1</sup>) à 2,5 mg.L<sup>-1</sup> de chaque pesticide et 1 mg.L<sup>-1</sup> de Cu ont été ajoutés à 2 g de sédiments ou 0,2 g de racines et agités pendant 2, 8, 24, 48, 72, 96 et 120 heures. Pour les isothermes d'adsorption, 10 mL (CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol.L<sup>-1</sup>) à différentes concentrations en pesticides (de 0,05 à 2,5 mg.L<sup>-1</sup>) et 1 mg.L<sup>-1</sup> de Cu ont été ajoutés à 2 g de sédiments ou 0,2 g de racines et agités pendant 48 ou 96 heures.

Les résultats permettront d'identifier (1) la part relative du mécanisme d'adsorption par rapport aux autres mécanismes de remédiation et (2) la contribution relative des sédiments et des macrophytes dans la réduction de la contamination au cours du traitement des eaux dans les bassins de rétention.

**Mots-Clés:** bassin de rétention, vignoble, intrants, pesticides, Cu, adsorption, sédiments, macro phytes

<sup>\*</sup>Intervenant

## Relationships between rock and soil chemical properties and rare earth element concentrations in the aboveground biomass

Olivier Pourret <sup>\*ψ1</sup>, Michel-Pierre Faucon <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> AGHYLE – Institut Polytechnique UniLasalle – France

The geochemical behavior of rare earth elements (REE) has been mainly investigated in geological systems where they represent the best proxies for processes occurring at the interface between different media. REE concentrations, normalized with respect to the upper continental crust, were used to assess their behavior. In this study, REE geochemical behavior was investigated in plant shoots of various plant species naturally growing on different substrates. *Anisopappus chinensis* (an original and unique metallophilous flora naturally growing from sites in Katanga, Democratic Republic of Congo) and soil samples were collected in four natural sites with contrasting pedogeological environments (e.g., parent rock type, pH, organic matter content) and highly variable REE contents. Moreover, *Calluna vulgaris* and *Erica tetralix* (two heather species that cohabit) and soils samples were collected in Montagne Noire, France. Soil and plant REE content was analyzed by ICP-MS. REE uptake by plants was primarily correlated with their concentrations and/or their speciation in the soil as it was previously shown in literature. Results from this study show that REE patterns in shoots are relatively flat whereas soils are enriched in middle REE. The geochemical behavior of REE illustrates that metals accumulation in aerial parts of studied plants is mainly driven by mechanisms involving REE complexation processes.

**Mots-Clés:** lanthanide, soil, plant

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: olivier.pourret@unilasalle.fr

## L'ajout de sidérophores bactériens peut-il aider à la phytoremédiation des sols viticoles ?

Sitraka Randriamamonjy <sup>\*ψ1</sup>, Morgane Gutierrez <sup>2</sup>, Kevin Rocco <sup>2</sup>, Aurelia Mouret <sup>1</sup>, Edouard Metzger <sup>1</sup>, Herve Capiaux <sup>1</sup>, Thierry Lebeau<sup>φ1</sup>, Jean-Yves Cornu<sup>§ 2</sup>

<sup>1</sup> LPG (Laboratoire de Planétologie et Géodynamique) - CNRS : UMR6112 - France

<sup>2</sup> ISPA (Intéractions Sol Plante Atmosphère) - Institut national de la recherche agronomique (INRA) - France

L'utilisation de fongicides à base de cuivre pour lutter contre le mildiou de la vigne a conduit à une contamination en Cu des horizons superficiels des sols viticoles. On suspecte cette contamination d'être à l'origine d'effets délétères sur la vigne conduisant à son dépérissement. Extraire du cuivre des sols viticoles grâce à des plantes métallo-accumulatrices en inter rang ou sur sol après arrachage de la vigne est une option dont l'efficacité est souvent limitée par la faible phytodisponibilité de Cu dans les sols. L'ajout de sidérophores bactériens pourrait contribuer à augmenter la phytodisponibilité de Cu, ces molécules chélatant fortement Fe(III) mais aussi de métaux divalents dont le Cu. Il convient toutefois de mieux comprendre comment ces molécules interagissent avec les constituants du sol et modulent la dynamique de Cu dans des contextes pédologiques contrastés.

L'objectif de ce travail est d'évaluer dans quelle proportion un ajout du sidérophore pyoverdine (Pvd) module la mobilité et la phytodisponibilité de Cu en sols viticoles. Ce travail s'appuie sur une collection de 11 sols viticoles de même teneur totale en Cu (120 ppm), sur lesquels ont été réalisées des extractions au CaCl<sub>2</sub> 0.005 M. La concentration en Cu total et en Cu libre de ces extraits a permis d'évaluer respectivement la mobilité et la phytodisponibilité de Cu dans ces sols, en présence (200 µmol kg<sup>-1</sup> sol) et en absence de Pvd.

Les premiers résultats montrent que la disponibilité de Cu peut varier d'un facteur 1000 entre sols de même teneur totale en Cu. Plus que la mobilité de Cu depuis la phase solide, c'est la spéciation de Cu en solution qui semble le plus conditionner sa phytodisponibilité, comme en témoigne la relation étroite observée entre pCu et pH dans les extraits étudiés. L'ajout de pyoverdine augmente de manière systématique la mobilité de Cu dans ces sols, en même temps que celle de Fe et Al. Le facteur de mobilisation de Cu varie de 1.4 à 16.5 suivant le sol, sans relation évidente avec ses caractéristiques physico-chimiques (pH, texture, richesse en matière organique). Pour autant, l'ajout de Pvd baisse de manière systématique la phytodisponibilité de Cu dans ces sols en raison d'une complexation fortement accrue de Cu - a priori à la Pvd - dans les extraits. L'ensemble de ces données soulignent que la participation du complexe Pvd-Cu au prélevement racinaire est indispensable pour que l'ajout de Pvd promeuve la phytoextraction de Cu en sols viticoles.

**Mots-Clés:** cuivre, pyoverdine, complexation, mobilité, phytodisponibilité, activité de l'ion libre

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: sitraka.randriam@gmail.com

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: thierry.lebeau@univ-nantes.fr

<sup>§</sup>Auteur correspondant: jean-yves.cornu@inra.fr

## Effet de la complémentarité écologique d'associations de légumineuses et d'une hyperaccumulatrice de nickel sur les caractéristiques physico-chimiques, biologiques du sol et l'accumulation du métal

Ramez Saad <sup>\*1,2</sup>, Bernard Amiaud <sup>2</sup>, Julien Ruelle <sup>2</sup>, Michel-Pierre Faucon<sup>3</sup>, Emile Benizri<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Sols et Environnement (LSE) – Université de Lorraine, Institut national de la recherche agronomique (INRA) : UMR1120 – Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex, France

<sup>2</sup> Université de Lorraine (UL) – Institut National de la Recherche Agronomique - INRA : UMR1120 – France

<sup>3</sup> UniLaSalle - Agroécologie, Hydrogéochimie, Milieux et Ressources : UP2018.C101 – France

L'agromine est la filière qui repose sur un ensemble de procédés agronomiques et industriels permettant l'extraction de métaux, tels le nickel (Ni), présents dans les sols ultramafiques, à l'aide de plantes hyperaccumulatrices. Mais la faible fertilité de ces sols limite l'efficience de la phytoextraction. Ainsi, développer des systèmes de cultures plus efficaces, basés sur l'association d'un hyperaccumulateur avec une légumineuse pourrait améliorer la fertilité des sols ultramafiques (fixation de l'azote atmosphérique par la légumineuse), mais aussi permettre, du fait d'une production de biomasse augmentée, de meilleurs rendements en Ni. Afin de mettre en évidence, d'un point de vue fonctionnel, l'intérêt d'un " assemblage " consistant en la co-culture d'une légumineuse et d'une plante hyperaccumulatrice (*Odontarrhena chalcidica*), nous avons étudié les traits fonctionnels de l'hyperaccumulateur, après conduite de celui-ci en couvert monospécifique ou après co-culture de l'hyperaccumulateur en association avec une légumineuse et destruction puis enfouissement de celle-ci. La présence d'un effet idiosyncratique, d'une légumineuse à une autre, a impliqué l'étude de diverses associations plante hyperaccumulatrice-légumineuses.

Une expérimentation en conditions contrôlées, conduite en pot, a été mise en place durant 3 mois. Huit associations différentes plante hyperaccumulatrice-légumineuses ont été testées. L'étude des traits fonctionnels de l'hyperaccumulateur, ainsi que l'effet des différentes associations sur l'efficience de la phytoextraction de Ni, les caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques du sol ont été envisagés. Un gradient de réponses pourra être mis en évidence suivant les légumineuses associées, sachant qu'elles ont été enfouies dans le sol sous forme d'engrais vert après 2 mois de culture.

Cette étude apportera des nouvelles connaissances sur l'écologie des plantes hyperaccumulatrices et plus largement sur les stratégies d'optimisation de l'agromine du Ni. Elle permettra de cerner si des traits fonctionnels inhérents à l'hyperaccumulateur, conduit en mono- ou co-culture, peuvent être mis en relation avec le processus d'accumulation du Ni et de production de biomasse. En outre, cette étude nous permettra d'identifier quelle légumineuse pourrait faciliter ces deux processus ; l'objectif, à plus long terme, étant une utilisation durable des sols ultramafiques par une restauration de leur fertilité physique, chimique et biologique.

**Mots-Clés:** Agromine, hyperaccumulateur, légumineuses, nickel, complémentarité écologique, traits fonctionnels

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>✉</sup>Auteur correspondant: Emile.benizri@univ-lorraine.fr

## Le rôle des plantes hyperaccumulatrices sur le fractionnement isotopique du Ni

Isabella Zelano <sup>\*1,2</sup>, Christophe Cloquet <sup>ψφ1</sup>, Guillaume Echevarria <sup>3</sup>, Anthony Van Der Ent <sup>4</sup>,  
Fabrice Fraysse <sup>2</sup>, Emmanuelle Montarges-Pelletier <sup>§2</sup>

<sup>1</sup> Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG) – Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7358 – France

<sup>2</sup> Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux (LIEC) – Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7360 – France

<sup>3</sup> Laboratoire Sols et Environnement (LSE) – Institut National de la Recherche Agronomique : UMRA1120, Université de Lorraine – France

<sup>4</sup> The University of Queensland – Australie

Bien qu'il soit généralement admis que le cycle biogéochimique des métaux est influencé par les processus biotiques, seules quelques données ont été publiées sur le rôle des organismes biologiques dans le fractionnement isotopique du Ni. Ainsi, la discrimination des isotopes stables du Ni a pu être démontrée au cours des processus d'accumulation dans les plantes (1, 2). La contribution de la végétation à la composition isotopique du Ni dans l'horizon supérieur des sols et son influence sur le Ni exporté vers le milieu aqueux sont reconnues (2), en particulier pour les plantes hyperaccumulatrices (HA). Cependant, les mécanismes de reconstitution des réserves de Ni disponible dans les sols par dissolution minérale et recyclage biogéochimique restent mal connus.

Afin de compléter ces travaux, une étude sur un système plante-sol a été développée, impliquant l'hyperaccumulateur *Rinorea Bengalensis*. D'une part ont été suivies les concentrations, la spéciation chimique et la signature isotopique du Ni dans les différents compartiments et d'autre part, la décomposition de la litière a été simulée en effectuant une expérience de lixiviation de 30 jours sur des feuilles du même hyperaccumulateur *Rinorea Bengalensis* (pouvant contenir jusqu'à 5% en poids de Ni dans les feuilles). 80% du Ni est libéré lors des 10 premiers jours, avec une composition isotopique plus lourde,  $\Delta^{60}\text{Ni} = 0,20\text{‰}$ .

L'étude de deux individus d'âge différent, en séparant les différents organes, montre une différenciation des isotopes stables entre les parties hautes (feuilles apicales) et les parties basses de la plante (racines). Cette différenciation s'atténue avec l'âge croissant de *Rinorea B*. Les sols montrent un enrichissement en isotopes lourds apparemment corrélé au type de sol et au stade d'évolution des individus accumulateurs.

1. T.-H.-B. Deng *et al.*, *Environ. Sci. Technol.* **48**, 11926–11933 (2014).
2. N. Estrade *et al.*, *Earth Planet. Sci. Lett.* **423**, 24–35 (2015).
3. Zelanot et al. *Chem.Geol.* **483**, 47–55 (2018).
4. van der Ent *et al.*, *Sci. Rep.* **7**, 41861 (2017).

**Mots-Clés:** cycle biogéochimique, Nickel, fractionnement isotopique, spéciation du Ni

<sup>ψ</sup>Intervenant

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: zelano@crpg.cnrs-nancy.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: cloquet@crpg.cnrs-nancy.fr

<sup>§</sup>Auteur correspondant: emmanuelle.montarges@univ-lorraine.fr

## **4.3. Suivi de processus biogéochimiques par mesure haute fréquence // Archivage géologique des pollutions**

## Archives sédimentaires : empreintes des contaminations dans le bassin de la Seine, de 1930 à nos jours

Sophie Ayrault <sup>\*ψ1</sup>, Philippe Bonte <sup>1</sup>, Matthieu Roy-Barman <sup>1</sup>, Laurence Lestel <sup>2</sup>, Jean-Marie Mouchel <sup>2</sup>,  
Elodie Guigou <sup>2</sup>, Fatima Tamtam <sup>2</sup>, Catherine Lorgeoux <sup>3</sup>, Johnny Gaspéri <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement [Gif-sur-Yvette] (LSCE) – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines : UMR8212, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives : DRF/LSCE, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8212 – France

<sup>2</sup> Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols (METIS) – Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, Ecole Pratique des Hautes Etudes, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7619 – France

<sup>3</sup> GeoRessources (UMR7359) – CNRS : UMR7359, Université de Lorraine – Faculté des Sciences et Technologies, Bd des Aiguillettes, BP70239, 54506 Vandoeuvre-les-Nancy, France

<sup>4</sup> Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains (LEESU) – AgroParisTech, Ecole des Ponts ParisTech, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12 – France

Les archives sédimentaires sont d'inestimables témoignages de l'histoire des bassins versants et des systèmes fluviaux. À travers l'expérience conduite dans le bassin de la Seine depuis la fin des années 1990, nous montrerons le potentiel de ces archives pour reconstruire l'état de contamination particulière d'un hydrosystème à une échelle séculaire et mettre en évidence l'impact du développement économique et démographique, des réglementations ou des changements technologiques sur cette contamination. En plus des métaux, dont les teneurs sont réglementairement mesurées dans les sédiments depuis le début des années 1980 alors qu'ils sont rejetés dans l'environnement depuis le début de l'Anthropocène, de nombreux contaminants font l'objet de nouvelles préoccupations des gestionnaires et des citoyens. Mais les données manquent pour étudier l'évolution de leur présence au cours du temps. Parmi ces contaminants, nous avons étudié la trajectoire temporelle de nombreux métaux, certains antibiotiques et des polluants organiques persistants (HAP, PCB, PBDE et AP) grâce aux données obtenues dans les carottes de sédiments prélevées dans divers contextes (plaines d'inondation, réservoir asséché, bras mort) dans les zones amont et aval du bassin de la Seine. Nous présenterons en particulier les trajectoires du plomb, dont la signature isotopique permet une analyse très fine des sources émettrices, et des antibiotiques comme un exemple de contaminants dont l'accumulation environnementale au-delà de quelques mois n'était pas envisagée ou considérée comme très faible. HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques ; PCB : polychlorobiphényles ; PBDE : polybromodiphényléthers ; AP : alkylphénols.

**Mots-Clés:** carotte sédimentaire, métaux, plomb, Seine

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: sophie.ayrault@lsce.ipsl.fr

## Using high-frequency monitoring to assess the water quality of the River Selle (northern France)

Pratima Bhurtun <sup>1</sup>, Gabriel Billon <sup>\*ψ1,2</sup>, Ludovic Lesven <sup>1,3</sup>, Cyril Ruckebusch <sup>1</sup>, Cédric Halkett <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Université de Lille / LASIR - CNRS, Université de Lille : UMR8516 – France

<sup>2</sup> Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et Raman - UMR 8516 (LASIR) - Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8516 – France

<sup>3</sup> Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et Raman (LASIR) - CNRS : UMR8516, Université Lille I - Sciences et technologies - Bâtiment C8 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France

<sup>4</sup> Agence de l'Eau Artois-Picardie - Ministère de l'énergie de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire – France

In Europe, the ecological and chemical protection of water bodies is governed by the Water Framework Directive (WFD). One of the main objectives of the WFD is to prevent the deterioration in water status. In France, the monitoring of water bodies is defined by the water agencies. The monitoring programmes are mostly based on a low-frequency sampling regime (weekly or monthly). However, low-frequency monitoring does not take into account the daily spatial-temporal variability of pollutants. In order to evaluate the vulnerability of water quality, it is important to implement a relevant monitoring strategy such as high-frequency approach. This study examines the evolution of the water quality dynamics of the River Selle (northern France) during dry weather and storm events. Two high-frequency monitoring stations were deployed from May 2016 to August 2016 at the upstream (Saint Souplet) and downstream (Cateau-Cambrésis) of the river. The strategic positioning of the monitoring stations also helped to assess the impact of a 20,000-inhabitant town (Cateau-Cambrésis) on the water quality of the River Selle. Parameters such as river flow, water temperature, oxygen, pH, conductivity, turbidity, total organic carbon (TOC), phosphates and nitrates were monitored at both stations every 10 minutes during the 4 months.

Results from this study helped to better understand the functioning of the River Selle. For example, during storm events, the average values of nitrates dropped from 34.2 to 25.9 mgNO<sub>3</sub>- L-1 and from 40.0 to 33.8 mgNO<sub>3</sub>- L-1 at Saint Souplet and Cateau-Cambrésis respectively. Conductivity followed the same trend. The dilution of the nitrates and conductivity during storm events, confirmed by clockwise hysteresis patterns, indicated that the River Selle is mainly fed by groundwater. During dry weather, the high-frequency monitoring highlighted diurnal variations in conductivity and turbidity at Saint Souplet. Results from advanced statistical data analysis (principal component analysis) showed that at Saint Souplet the water quality is not affected by anthropogenic pressures unlike at Cateau-Cambrésis.

**Mots-Clés:** high frequency monitoring, river, urban impact, agriculture impact, daily cycle, storm event

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: gabriel.billon@univ-Lille.fr

## Projet ARCHEO (2017-2021) Reconstitution de l'historique des concentrations en radionucléides ayant transité dans les grands fleuves français au cours de l'ère nucléaire à l'échelle nationale, à partir d'archives

Frédérique Eyrolle <sup>\*ψ1</sup>, Hugo Lepage <sup>1</sup>, Rodolfo Gurriaran <sup>1</sup>, Amandine Morereau <sup>1</sup>,  
Catherine Cossonnet <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Laboratoire de Recherche sur les Transferts de radionucléides dans les écosystèmes Aquatiques (IRSN) – Centre de Cadarache, 13115 Saint Paul lez Durance – France

<sup>2</sup> Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Laboratoire de métrologie de la radioactivité dans l'environnement (IRSN) – 91400 Orsay – France

L'évolution tant des préoccupations environnementales, des techniques d'ingénierie que des choix politiques, a été très marquée au cours de l'ère industrielle, conduisant parfois à un manque d'informations sur les conséquences environnementales des différentes installations industrielles mises en service par le passé. Des témoignages environnementaux sur ces conséquences peuvent être investigués aujourd'hui, de manière rétrospective, par l'étude d'archives sédimentaires caractéristiques des environnements de dépôts au sein des hydrosystèmes fluviaux. Ces objets d'investigation sur les pollutions du passé des grands fleuves ont été largement explorés au cours des dernières années, en particulier en France, dans la Garonne (Grousset et al., 1999), le Rhin (Berner et al., 2012), le Rhône (Ferrand et al., 2012 ; Provansal et al., 2012), la Loire (Grosbois et al., 2012 ; Dhivert et al., 2015) ou encore la Seine (Meybeck et al., 2007 ; Hamzeh et al., 2013 ; Vrel et al., 2013), pour différentes familles de contaminants.

Le projet ARCHEO (2017-2021, IRSN 2016) a pour objectif de reconstruire les séries temporelles des concentrations en radionucléides ayant transité dans les fleuves français nucléarisés au cours de l'ère nucléaire à partir de l'étude d'archives sédimentaires. Il permettra de compléter les données de la surveillance sur des périodes non couvertes par les observations, et pour des radionucléides non recherchés par le passé et de mieux connaître les termes sources. La construction des frises géochronologiques retracant les différents forçages sera réalisée à partir d'archives documentaires. Ces chroniques seront mises en perspective avec les archives sédimentaires afin d'évaluer les trajectoires géo-historiques, les temps de résilience, et l'effet des actions anthropiques sur les niveaux de radioactivité au sein des hydrosystèmes. Le projet a également pour objectif de reconstruire les flux à partir des enregistrements de dépôts en particulier vers le domaine marin. Les sept grands bassins fluviaux français (Rhône, Loire, Garonne, Seine, Meuse, Moselle et Rhin) seront étudiés. Les archives sédimentaires seront recherchées à l'aval des exutoires afin de rendre compte d'une image générique représentative de l'ensemble des différents bassins. Elles couvriront à minima les 100 dernières années afin de couvrir l'ensemble de l'ère nucléaire. Le projet ARCHEO s'appuie pleinement sur le projet INTERPOL (Inter ZA) et les équipes associées.

**Mots-Clés:** Archives, Radionucléides, fleuves, sédiments, trajectoires

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: frederique.eyrolle@irsn.fr

## Archivage sédimentaire dans le réseau d'assainissement unitaire d'Orléans : une simple question de contributions respectives eaux usées / eaux pluviales ?

Jérémy Jacob <sup>\*1</sup>, Anaëlle Simonneau <sup>1</sup>, Alexandre Thibault <sup>1</sup>, Thomas Thiebault <sup>1</sup>, Aurélie Diacre <sup>1</sup>, Claude Lemilbeau <sup>1</sup>, Rachel Boscardin <sup>1</sup>, Christian Di Giovanni <sup>1</sup>, Laëtitia Fougere <sup>2</sup>, Emilie Destandau <sup>2</sup>, Cédric Morio <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO - UMR 7327) – Centre national de la recherche scientifique - CNRS (France), Université d'Orléans, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

<sup>2</sup> Institut de Chimie Organique et Analytique (ICOA) – CNRS : UMR7311, Université d'Orléans – UFR Sciences Rue de Chartres - BP 6759 45067 ORLEANS CEDEX 2, France

<sup>3</sup> Aggl'O, Direction du Cycle de l'Eau et des Réseaux d'Energie, 1, rue Jacques Dufrasnes, 45 380 La Chapelle Saint Mesmin – Orléans Métropole – France

Dans le cadre du projet Golden Spike (INSU, EC2CO/BIOHEFFECT 2017-2018), nous explorons le potentiel des archives sédimentaires en contexte urbain pour retracer l'évolution récente et multithématische de la ville. La chambre à sable d'Orléans, bassin de décantation collectant le réseau d'assainissement unitaire du nord de l'agglomération, subit des phases de curage renouvelées tous les 6 mois, ce qui permet d'accompagner à nouveau entre 2 et 3 m de sédiments résultant de la décantation des matières provenant des eaux usées et eaux pluviales durant cette période de temps.

Les campagnes de carottage réalisées avant curage en mars 2016 et avril 2017 ont permis de recueillir deux séries sédimentaires de près d'1,5 m de long couvrant plusieurs mois d'activité de la chambre à sable. Les carottes ont bénéficié d'analyses sédimentologiques, géochimiques, d'observations microscopiques et de datations par radioéléments.

Les sédiments des deux carottes s'organisent en un faciès très organique sur la moitié inférieure et un faciès minéral grossier alternant avec des passées plus fines sur la partie supérieure de la carotte. Les résultats <sup>7</sup>Be indiquent que les sédiments organiques de la partie inférieure de la carotte datent de plus de 6 mois.

La comparaison de l'évolution de la granulométrie en fonction de la profondeur dans les carottes avec l'évolution des précipitations durant la période considérée suggère un contrôle des apports respectifs eaux usées/eaux pluviales sur la sédimentation, avec des apports essentiellement organiques en période sèche et des apports minéraux grossiers provenant des rues, trottoirs et caniveaux drainés par le réseau d'eaux pluviales en période de fortes précipitations. Ainsi, il semble possible de préciser le modèle d'âge de la carotte par la corrélation de passées grossières avec les événements de précipitations.

Cette conclusion semble confirmée par la distribution de marqueurs originaux attribuables soit aux eaux pluviales (microbilles de verre du marquage au sol de la chaussée, onocérane et nor-onocérane du bitume, n-alkanes pétroliers...), soit aux eaux usées (marqueurs fécaux, n-alkanes de végétaux vasculaires). Toutefois, la distribution de certains marqueurs organiques (HAP, médicaments et drogues) semble davantage être conditionnée par leur archivabilité liée à la nature du sédiment (organique ou minéral) que par leur origine.

**Mots-Clés:** Sédiments, assainissement, polluants émergents

<sup>\*</sup>Intervenant

## Trace metal legacy on mountains aquatic ecogeochemistry (TRAM)

Gael Le Roux <sup>\*ψ1</sup>, Adrien Claustres <sup>1</sup>, Maxime Enrico <sup>1,2,3</sup>, Pilar Durantez <sup>1</sup>, Sophia Hansson <sup>1,4</sup>,  
 François De Vleeschouwer<sup>φ1</sup>, Anaëlle Simonneau <sup>5</sup>, Stephane Binet <sup>5</sup>, Laure Gandois <sup>1</sup>,  
 Florence Mazier <sup>6</sup>, Laurent Marquer <sup>1,6</sup>, Roman Teisserenc <sup>1</sup>, Deonie Allen <sup>1</sup>, Anne Probst <sup>1</sup>,  
 Didier Galop <sup>6</sup>, Tram Team <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ecolab CNRS-Université de Toulouse (EcoLab) - CNRS : UMR5245, Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, Université Paul Sabatier - Toulouse III - France

<sup>2</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) - Université Paul Sabatier - Toulouse III, Observatoire Midi-Pyrénées, CNRS : UMR5563, IRD : UR234 - 14 avenue Edouard Belin 31400 Toulouse, France

<sup>3</sup> Institut des sciences analytiques et de physico-chimie pour l'environnement et les matériaux (IPREM) - Université de Pau et des Pays de l'Adour, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5254 - France

<sup>4</sup> Department of Bioscience Arctic Research Centre, Aarhus University - Danemark

<sup>5</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO - UMR7327) - Centre National de la Recherche Scientifique, Université d'Orléans, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

<sup>6</sup> GEODE, Géographie de l'Environnement, CNRS, Université Jean-Jaurès Toulouse - CNRS : UMR5602 - France

Due to their geological features, mountain environments have been exploited since the beginning of metallurgy. The Pyrenees are no exception as many mining sites in the region have been dated back to the Bronze Age resulting in a potential human impact on the environment on millennial scales. The mountain landscape is sensitive both to human-induced environmental changes - e.g. agriculture, mining, clear cutting- and climate-induced rapid environmental fluctuations. The legacy of trace metals stocked within the mountain watersheds is poorly understood. Pyrenees provide a perfect mountain range for detailed scientific investigations on the fate and impact of anthropogenic potentially harmful trace elements on the ecological functioning of mountain catchments, including high altitude lakes. Environmental archives provide valuable chronologies of trace metal loadings on terrestrial and aquatic ecosystems throughout the Holocene and beyond. Our study focuses on three mountain watersheds located in the central Pyrenees and on specific trace metals: Pb, Cu, Sb, Hg recorded in environmental archives. Whereas Sphagnum peatlands provide ideal past records of atmospheric deposition, lake sediments illustrate chemical loads from the entire watersheds. We will discuss the differences between the archives and the time periods and we will show how a landscape approach can help to understand the impact of early industrialisation. We will show that if long-term transport of trace metals could have occurred in preindustrial periods, a large part of trace metal contamination may be due to local metallurgical activities and further remobilization due to soil and vegetation degradation. We will show how the comparison between peat and lake archives can be used to investigate stability, disturbances and the resilience of mountain watersheds.

**Mots-Clés:** mountain, peatlands, lakes, sediments, environmental archives

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: gael.leroux@ensat.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: francois.devleeschouwer@ensat.fr

## Reconstitution des teneurs en radionucléides de deux bassins versants nucléarisés aux profils hydrosédimentaires différents

Amandine Morereau <sup>\*ψ1</sup>, Hugo Lepage <sup>1</sup>, Frédérique Eyrolle <sup>1</sup>, Cécile Grosbois <sup>2</sup>, Marc Desmet <sup>2</sup>, Brice Mourier <sup>3</sup>, Thierry Winiarski <sup>3</sup>, Catherine Cossonnet <sup>4</sup>, David Mourier <sup>1</sup>, Franck Giner <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) – Laboratoire de Recherche sur les Transferts de radionucléides dans les écosystèmes Aquatiques - France

<sup>2</sup> GéoHydroSystèmes COntinentaux (GéHCO EA6293) – Université François Rabelais - Tours - France

<sup>3</sup> Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés (LEHNA) – Université Claude Bernard Lyon 1, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5023 – Université de Lyon 69622 Villeurbanne Cedex - 69518 Vaulx-en-Velin, France

<sup>4</sup> Laboratoire de mesure de la radioactivité dans l'environnement (IRSN/PSE-ENV/SAME/LMRE) – Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) – France

La nucléarisation des grands fleuves français au cours du siècle dernier est sujette à des préoccupations environnementales et sociétales particulièrement émergeantes dans le contexte actuel des transitions énergétiques. Les concentrations en radionucléides issus de ces installations peuvent être reconstituées par l'analyse d'archives sédimentaires. Le Rhône et la Loire présentent de nombreuses industries nucléaires et un fonctionnement hydrosédimentaire très spécifique à chacun. Avec son chenal endigué et ses 19 barrages hydroélectriques qui régulent les crues et le transport sédimentaire (50 à 200 t/an/km<sup>2</sup>), le Rhône est fortement anthropisé et draîne des massifs alpins très érosifs. La Loire présente une succession de processus morphosédimentaires et de régimes hydrologiques très contrastés avec de nombreux barrages dans les têtes de bassins, un lit endigué dans son cours moyen et un flux solide spécifique annuel compris entre 5 et 20 t/km<sup>2</sup>/an (Moatar et Dupond, 2016). Une archive a été collectée en aval de l'ensemble des installations nucléaires dans chacun de ces fleuves. L'archive sédimentaire sur le Rhône a été réalisée grâce à des mesures par géoradar afin d'optimiser la localisation du carottage. La datation de cette archive s'est avérée complexe car les industries nucléaires, et notamment le centre de retraitement du combustible usagé de Marcoule, ont engendré des rejets en <sup>137</sup>Cs qui masquent l'identification des événements passés habituellement rencontrés dans les dépôts sédimentaires, i.e., pic des retombées atmosphérique des essais nucléaires (1963) et de Tchernobyl (1986). Le modèle d'âge de la Loire repose également sur la variabilité d'activité en <sup>137</sup>Cs partiellement en lien avec les chroniques de rejets des industries nucléaires ligériennes. Sur cette archive, des anomalies de plutonium et de curium (radionucléides issus de rejets accidentels) viennent consolider le modèle d'âge établi par Grosbois et al., 2012. Ces premiers travaux indiquent que sur les fleuves nucléarisés, l'âge et l'origine des dépôts sédimentaires sont à reconstruire à l'aide de différents proxy de datation, en particulier : (1) les chroniques de rejets des installations nucléaires (2) les séries temporelles de concentrations en radionucléides acquises sur les matières en suspension dans le cadre de la surveillance conduite par l'IRSN et (3) les rapports isotopiques propres aux industries nucléaires.

**Mots-Clés:** archives sédimentaires, radionucléides, Rhône, Loire

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: amandine.morereau@irsn.fr

## DTWBI & uHMM R-packages for multivariate time series preprocessing and interpretation

Emilie Poisson Caillault <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Kelly Grassi <sup>1,2,3</sup>, Thi Thu Hong Phan <sup>1,4</sup>, Camille Dezecache <sup>1</sup>,  
Jean Prygiel <sup>5,6</sup>, Alain Lefèvre <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Informatique Signal et Image de la Côte d'Opale – Univ du Littoral Côte d'Opale : EA4491 – France

<sup>2</sup> WeatherForce – WeatherForce – France

<sup>3</sup> IFREMER Laboratoire Environnement et Ressources, Boulogne-sur-mer – France

<sup>4</sup> Vietnam National University of Agriculture (VNUA) – Vietnam National University of Agriculture – France

<sup>5</sup> Agence de l'Eau Artois-Picardie – Agence de l'Eau en France (FRANCE) – France

<sup>6</sup> Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et Raman - UMR 8516 (LASIR) – Université de Lille, CNRS : UMR8516, Fr

Several challenges are associated with using HF collected data and requires optimized numeric tools to deal with this amount of information. We present two R packages uHMM and DTWBI, which enables the fast computation of segmentation/classification and prediction of multivariate times series with missing values.

The DTWBI package provides routines for imputing large gaps within time series based on dynamic time warping methods. Several signal representation are implemented (local derivative: DDTW, adaptive local/global feature: AFDTW) and performance criteria are added to compare similarity between two signals (query and reference).

The uHMM package provides routines and friendly end-user interface for detecting recurrent or extreme events in a multivariate dataset and to characterize their dynamic, by building an unsupervised Hidden Markov Model. It offers many functionalities from the correction and selection of variables to the classification, modeling and prediction of times series. Besides, optimized methods of clustering (fast kmeans, fast spectral clustering) are proposed to deal with HF dataset.

Developed algorithms provide an efficient computational framework for exploiting all available information without any a priori knowledge and undertaking studies from large spatio-temporal scales events (phytoplankton bloom dynamics for example) until extreme events detection (storms, floods). Several numerical examples in climatology, water quality monitoring demonstrate the usage of the DTWBI and uHMM packages.

*Thi-Thu-Hong Phan, Émilie Poisson Caillault, Alain Lefebvre, André Bigand, Dynamic time warping-based imputation for univariate time series data, Pattern Recognition Letters, 2017, ISSN 0167-8655, <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2017.08.019>.*

*T. T. H. Phan, É. P. Caillault, A. Bigand and A. Lefebvre, "DTW-Approach for uncorrelated multivariate time series imputation," 2017 IEEE 27th International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP), Tokyo, 2017, pp. 1-6. <https://doi/10.1109/MLSP.2017.8168165>.*

*K. Rousseeuw, É. Poisson Caillault, A. Lefebvre and D. Hamad, "Hybrid Hidden Markov Model for Marine Environment Monitoring," in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 8, no. 1, pp. 204-213, Jan. 2015. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.23412>*

<https://cran.r-project.org/web/packages/uHMM/index.html> <https://cran.r-project.org/web/packages/DTWBI/index.html>

**Mots-Clés:** multivariate time series, event detection, unsupervised classification, dynamic time warping, missing values, R.

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>¶</sup>Auteur correspondant: emilie.poisson@univ-littoral.fr

## Suivi physico-chimique et algal en haute-fréquence du marais d'Isle de Saint-Quentin : Apport de l'interface uHMM pour l'exploitation des données

Emilie Poisson Caillault <sup>\*ψ1</sup>, Emilie Prygiel <sup>φ2</sup>, Cédric Halkett <sup>3</sup>, Jean Prygiel <sup>4,3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Informatique Signal et Image de la Côte d'Opale – Université du Littoral Côte d'Opale : EA4491 – Fr

<sup>2</sup> Cerema – Ministère de l'écologie de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, Saint-Quentin, France

<sup>3</sup> Agence de l'Eau Artois-Picardie – France

<sup>4</sup> Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et Raman - UMR 8516 (LASIR) – Université de Lille, CNRS : UMR8516, Fr

Le Marais d'Isle de Saint-Quentin est une Réserve Naturelle Nationale dont la particularité est sa situation en centre-ville. Ce marais se compose de nombreux étangs, alimentés de façon complexe par différents affluents dont la rivière Somme, par des résurgences de la nappe souterraine et par de probables échanges avec le canal de Saint-Quentin qui longe le marais. Une vanne située à son exutoire permet la régulation de la hauteur d'eau, nécessaire au développement de ses roselières. Cependant, du fait de la proximité de la Réserve avec des activités urbaines, agricoles et industrielles, une partie du marais est sujette depuis plusieurs années à des proliférations d'algues filamentueuses, reflet d'une eutrophisation du milieu.

Afin de mieux appréhender le fonctionnement du marais, une bouée de mesure automatique a été déployée de février à décembre 2017. Trois pigments algaux et des paramètres physico-chimiques ont ainsi été mesurés en haute-fréquence (1 mesure par heure) pendant près d'un an. L'enregistrement de séries temporelles relativement longues nécessite cependant l'aide de modèles pour faciliter l'exploitation des données, et mettre en évidence des événements importants.

Grâce à l'utilisation d'un Modèle de Markov Caché (MMC), l'interface uHMM a été développée avec l'objectif de caractériser la dynamique de séries temporelles. Cet outil permet de détecter des états environnementaux, qui tiennent compte de l'ensemble des paramètres mesurés.

Ce modèle a été appliqué aux données enregistrées sur le marais en 2017, et a permis de mettre en évidence 5 états environnementaux principaux. On distingue ainsi 2 états correspondant à des périodes de transition accompagnant (1) la fin de l'hiver et le début du printemps, et (2) la fin de l'automne et le retour de l'hiver, caractérisés par de basses températures de l'eau et de faibles variations algales. L'état 3 est illustré par les poussées phytoplanctoniques, en particulier liées aux diatomées, dont les occurrences sont observables au printemps puis à l'automne. Enfin, les états 4 et 5 représentent la dynamique estivale, fortement marquée par des proliférations d'algues filamentueuses et illustrées grâce au modèle par des alternances de (4) sursaturation en oxygène le jour et (5) des sous-saturations la nuit, en lien avec les cycles de photosynthèse/respiration de ces végétaux aquatiques.

K. Rousseeuw, É. Poisson Caillault, A. Lefebvre and D. Hamad, "Hybrid Hidden Markov Model for Marine Environment Monitoring," in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 8, no. 1, pp. 204-213, Jan. 2015. doi: 10.1109/JSTARS.2014.2341219

<https://cran.r-project.org/web/packages/uHMM/index.html>

**Mots-Clés:** haute, fréquence, bouée automatique, plan d'eau, phytoplancton, modèle de Markov caché, classification spectrale\*

## Sources et fontaines à Paris : les dépôts carbonatés comme témoin des eaux du passé

Edwige Pons-Branchu <sup>\*ψ1</sup>, Matthieu Roy-Barman <sup>φ1</sup>, Philippe Branchu <sup>2</sup>, Emmanuel Dumont <sup>2</sup>, André Guillerme <sup>3</sup>, Jean-Luc Michelot <sup>4</sup>, Liliane Jean-Soro <sup>5</sup>, Eric Douville <sup>1</sup>, Sophie Ayrault <sup>1</sup>, Louise Bordier <sup>1</sup>, François Thil <sup>1</sup>, Lorna Foliot <sup>1</sup>, Arnaud Dapoigny <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement [Gif-sur-Yvette] (LSCE) – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines : UMR8212, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives : DRF/LSCE, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8212 – France

<sup>2</sup> Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement - Direction Ile-de-France (Cerema Direction Ile-de-France) – Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement – France

<sup>3</sup> Conservatoire National des Arts et Métiers [Cnam] : EA3716 – Conservatoire National des Arts et Métiers (Cnam) – France

<sup>4</sup> Géosciences Paris Sud (GEOPS) – Université Paris-Sud - Paris 11, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8148 – France

<sup>5</sup> IFSTTAR (IFSTTAR) – Ministère de l'Environnement – France

Les nappes perchées parisiennes, drainées via des aqueducs pour alimenter des sources et fontaines ont constitué pendant des siècles une ressource en eau de prime importance. Cependant, celles-ci ont été délaissées comme source d'eau potable, du fait de la dégradation de leur qualité, attestée notamment par des témoignages du 19<sup>eme</sup> siècle.

Ces eaux ont laissé au cours de leur cheminement des dépôts calcaires, déposés année après année, qui, tels les spéléothèmes des grottes, constituent de véritables archives du passé. La détermination de leur chronologie précise couplée à des analyses géochimiques (éléments en traces ou isotopie d'éléments clés tels Sr, S ou encore Pb) permet de reconstituer l'évolution temporelle de certaines pollutions, et dans certains cas leur origine. L'approche que nous proposons couple ces reconstitutions géochimiques avec l'histoire de l'évolution de la ville, pour contraindre l'apport/les sources de certaines pollutions des eaux.

Nous présenterons en particulier l'exemple de la pollution en sulfates des eaux des sources du nord (NE de Paris), et du lien établi avec les remblais et le gypse qu'ils contiennent, mis en place lors de l'urbanisation de la zone.

**Mots-Clés:** Pollution, Hydrologie, Urbain, isotopes, speleothèmes

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: edwige.pons-branchu@lsce.ipsl.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: barman@lsce.ipsl.fr

## The hidden deposits of the 2009 South Pacific Tsunami in Pago Pago Bay (Tutuila, American Samoa): a new proxy for industrialized areas

Brieuc Riou <sup>\*ψ1,2</sup>, Eric Chaumillon<sup>φ1</sup>, Jean-Luc Schneider <sup>2</sup>, Thierry Corrège <sup>2</sup>, Catherine Chagué <sup>3</sup>, Johanna Jupin <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Littoral Environnement et Sociétés - UMR 7266 (LIENSs) - Université de La Rochelle, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7266 - France

<sup>2</sup> Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux - UMR 5805 (EPOC) - Université de Bordeaux (Bordeaux, France) : UMR5805 - France

<sup>3</sup> School of Biological, Earth and Environmental Sciences (UNSW - BEES) - Australie

<sup>4</sup> Université de Bordeaux (UB) - Université de Bordeaux (Bordeaux, France) - France

The South Pacific Tsunami (SPT, 29th Sept. 2009) struck Tutuila (American Samoa) with waves up to 7 m inundating Pago Pago Bay up to 500 m inland. Unlike inland deposits, shallow marine deposits are not impacted by subaerial erosion and human activities, but mainly by bioturbation and wave reworking. They are more likely to be preserved in deep and sheltered bays, which is why we explored Pago Pago Bay (Tutuila, American Samoa) during the SAMOA-SPT campaign (on board R/V Alis). A first standard multi-proxy approach based on seismic data and the collection and description of ten cores did not reveal any evidence of the 2009 SPT shallow marine deposits in the bay (Riou et al., submitted). Nevertheless, a great quantity of material was transported and deposited into Pago Pago Bay as can attest photographs after the 2009 SPT. A second more thorough investigation presented here is based on thin sections and geochemical analysis, including XRF core scanning and a new method involving the analysis of pollutants contamination.

The visual description, X-ray and grain size suggest a highly homogeneous sedimentation throughout the first 60 cm below the surface. Meanwhile, accumulation rates based on <sup>210</sup>Pb activity indicate that the 2009 SPT deposits should be found in the uppermost 10 cm. XRF scanning of all cores revealed a spike of terrestrial input reflected by a peak of the Ti/Ca ratio for the seven most proximal cores (< 1 km from shore), between 5 and 10 cm deep. Thin section analysis also revealed a thin layer (< 5 cm) composed mainly of biogenic and terrigenous material such as broken gastropod shells or root fragments, contrasting with the surrounding homogeneous silt. Analysis of metallic pollutants contamination in the biogenic and terrigenous layer, characterized by a peak in the Ti/Ca ratio, are in progress. They should confirm that onshore accumulation of metallic pollutants characteristic of urban areas (e.g. copper, zinc), have been washed away and deposited in the bay by the 2009 tsunami backwash.

The hidden deposits of the 2009 SPT in Pago Pago Bay are most likely to be revealed using mainly a geochemical approach. These deposits were highly diluted and do not vary in color or grain size, which explains the "failure" of standard proxies. This study shows the importance of geochemical proxies for tsunami identification, and particularly metallic pollutants in industrialized areas.

**Mots-Clés:** 2009 South Pacific Tsunami, shallow marine tsunami deposits, multi, proxy approach, geochemistry, metallic pollutants

## Comment analyser les données haute fréquence? Prendre en compte les valeurs manquantes et l'aspect multi-échelles

Francois Schmitt \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – CNRS : UMR8187, Université des Sciences et Technologies de Lille - Lille I, Université du Littoral Côte d'Opale - France

Les données automatiques mesurées à haute fréquence par des systèmes en point fixe (par exemple MAREL à Boulogne-sur-mer) présentent une dynamique multi-échelle, avec de nombreux courts épisodes de fortes fluctuations, et également de nombreuses plages de valeurs manquantes. Les méthodes d'analyse proposées doivent pouvoir prendre en compte ces différentes propriétés. Ici nous proposons une vision globale des différentes méthodes déjà utilisées pour analyser ce type de données: densité de probabilité, analyse spectrale, fonctions de structure, propriétés multifractales liées à la turbulence.

Nous présentons tout particulièrement la méthode EMD-Empirical Mode Decomposition, associée à une estimation de l'énergie spectrale utilisant la transformation de Hilbert. Cette méthode fonctionne pour des données irrégulières présentant des valeurs manquantes ; elle permet d'estimer les propriétés multi-échelles des fluctuations ; elle permet aussi de réaliser une étude multi-échelle des corrélations entre 2 séries (Huang et Schmitt, 2014; Schmitt et Huang, 2016; Schmitt et Lefebvre, 2016). Plusieurs exemples utilisant les données biogéochimiques de MAREL Carnot seront présentés.

Huang Y., F. G. Schmitt, Z. Lu, Y. Liu, *An amplitude-frequency study of turbulent scaling intermittency using Hilbert spectral analysis*, *EPL* 84, 40010, 2008.

Huang, Y., F.G. Schmitt, J.-P. Hermand, Y. Gagne, Z. M. Lu, Y.L. Liu, *Arbitrary order Hilbert spectral analysis for time series possessing scaling statistics: a comparison study with detrended fluctuation analysis and wavelet leaders*, *Physical Review E* 84, 016208, 2011.

Huang, Yongxiang, François G Schmitt, *Application of an empirical mode decomposition based time dependent intrinsic correlation to marine data*, *Journal of Marine Systems* 130, 90-100, 2014.

Schmitt FG, G. Dur, S. Souissi, S.B. Zongo, *Statistical properties of turbidity, oxygen and pH fluctuations in the Seine river estuary (France)*, *Physica A*, 387, 6613-6623, 2008.

Schmitt, F.G. et Huang Y. *Stochastic analysis of scaling times series: from turbulence theory to applications*, Cambridge University Press, 2016, 220pp. ISBN: 9781107067615.

Schmitt, F.G. et Lefebvre A. (Eds.) *Mesures à haute résolution dans l'environnement marin côtier*, CNRS Editions, 2016, 164pp. ISBN: 978-2-271-08592-4.

**Mots-Clés:** Haute fréquence, turbulence, multi, échelles, intermittence, Décomposition Modale Empirique, densité de probabilité

\*Intervenant

## Suivi de la matière organique dissoute à l'échelle de la journée dans la Deûle

Pierre-Jean Superville <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Junias Adusei-Gyamfi <sup>1</sup>, David Dumoulin <sup>1</sup>, Justine Criquet <sup>1</sup>,  
Jean Paul Cornard <sup>1</sup>, Gabriel Billon <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et Raman - UMR 8516 (LASIR) – Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8516 – France

La matière organique dissoute est un ensemble de macromolécules complexes d'origine naturelle ou anthropique, autochtone ou allochtone, présentant une large gamme de compositions chimiques et de groupements fonctionnels. Dans le milieu aquatique, ces espèces ont un impact important puisqu'elles complexent fortement les éléments traces métalliques et peuvent ainsi modifier leur biodisponibilité. Au sein de l'équipe physicochimie de l'environnement du LASIR, l'étude des variations des métaux traces à l'échelle de la journée a été réalisée sur plusieurs cours d'eau dans le passé. Des cycles jour/nuit ont été enregistrés et en partie expliqués. Cependant, l'évolution de la matière organique sur ces cycles a souvent été considérée comme négligeable. L'étude préliminaire présentée dans ce poster s'intéressera à vérifier la justesse de cette hypothèse. La rivière Deûle au niveau d'Auby (Nord) a été choisie comme site d'étude puisque de nombreux suivis haute fréquence sur la contamination métallique ont déjà été effectués à cet endroit. Un prélevageur filtreur automatisé a été déployé pendant une semaine et des analyses de la matière organique ont été réalisées sur les échantillons récoltés. Des mesures de carbone organique dissous, d'absorbance moléculaire UV-visible, de spectroscopie de fluorescence ainsi que de la chromatographie à exclusion stérique (SEC-HPLC) couplée à des détecteurs UV-visible, spectroscopie de fluorescence et spectroscopie de masse ont permis une caractérisation fine de la matière organique. L'interprétation des résultats permettra à terme de comprendre la dynamique de l'interaction matière organique - métaux dans le milieu aquatique.

**Mots-Clés:** Matière organique dissoute, suivi haute fréquence, rivière, cycle journalier, fluorescence, chromatographie à exclusion stérique

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>#</sup>Auteur correspondant: pierre-jean.superville@univ-lille.fr

## Evolution of manganese speciation at the daily and seasonal scale in the Marque River (northern France)

Pierre-Jean Superville <sup>\*ψ1</sup>, Anastasia Ivanovsky <sup>1</sup>, Pratima Bhurtun <sup>1</sup>, Jean Prygiel <sup>1,2</sup>, Gabriel Billon <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et Raman - UMR 8516 (LASIR) - Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8516 - France

<sup>2</sup> Agence de l'Eau Artois-Picardie - Agence de l'Eau en France (FRANCE) - France

Electrolabile reduced manganese (II) has been monitored by voltammetry during two periods of one month in summer 2014 and early spring 2015 in a small river (the Marque River) located in northern France and going through a suburban area with agricultural activities. Diel variations, evolution within the one-month periods and seasonal differences have been observed. Taking into consideration the multiple physical, biological and chemical reactions regulating manganese speciation in aquatic systems, it has been demonstrated that manganese speciation is probably controlled by the competition of two antagonist reactions: the photoreduction of manganese oxides (in broad sense and represented thereafter by MnOx) and the biotic oxidation of Mn(II). Depending on the season, the biological activity in the river and the amount of luminosity reaching the MnOx, either the production of reduced labile Mn(II) or the precipitation of MnOx can become the dominant process. Other punctual events such as the drop of oxygen concentration due to large inputs of biodegradable organic matter and eutrophication phenomena, rainy events and high luminosity periods can also affect the behaviour of dissolved Mn(II) in the Marque River and so, of other contaminants. Indeed, it has been observed that zinc speciation seems to be controlled by MnOx dissolution in spring.

**Mots-Clés:** Manganese, high frequency monitoring, voltammetry, river, diel cycles, seasonal effect, zinc

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: pierre-jean.superville@univ-lille.fr

## **4.4. L'imagerie radar pour les Géosciences : la révolution SENTINEL 1A/1B**

## Suivi des cultures dans le périmètre du Loukkos-Maroc : Apport de la télédétection radar et optique

Siham Acharki <sup>\*ψ1</sup>, Mina Amharref <sup>1</sup>, Pierre-Louis Frison <sup>2</sup>, Jean-Paul Rudant <sup>2</sup>, A. Samed Bernoussi <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Equipe de recherche Géoinformation et Aménagement du Territoire (GAT), Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, Université Abdelmalek Essaadi, Tanger, Maroc. – Maroc

<sup>2</sup> Laboratoire en Sciences et Technologies de l'Information Géographique (LaSTIG) – UPEM - Université Paris-Est Marne-la-Vallée – France

Dans ce travail, nous analysons la possibilité d'amélioration de la classification des cultures dans un périmètre irrigué du nord du Maroc en se basant sur la combinaison des données multi-temporelles de trois satellites (Sentinel-1, Sentinel-2 et Landsat8) avec l'inclusion de cinq indices (NDVI et OSAVI pour la végétation, BSI pour le sol, NDWI pour l'eau et NDBI pour l'urbanisation). Le périmètre concerné (Loukkos), en plus de sa position stratégique, se caractérise par un climat méditerranéen avec une forte valeur écologique. Il présente une intense activité agricole avec une diversité de cultures. Lesquelles en nuance avec les prédictions des scientifiques pourraient être affectées par le changement climatique.

Afin de confirmer ou infirmer cette possibilité, nous utilisons des séries d'images satellitaires acquises pendant deux périodes : 09/2016-08/2017 et 09/2017-08/2018. Puis nous faisons subir à ces images collectées diverses phases de traitement telles que : (i) calibration, ortho-rectification et filtrage temporel pour Sentinel-1 et (ii) correction radiométrique atmosphérique, mosaïque, reprojection, réenchantiollange des bandes pour Sentinel-2 et Landsat8. A ces traitements, nous injectons des données d'entraînement que nous créons sur la base des photos issues d'enquêtes de terrain menés durant les mois de mars à août 2018.

Une fois les traitements effectués et les données d'entraînement injectées, nous déterminons les classes d'occupation du sol en appliquant la classification supervisée via l'algorithme " forêts aléatoires ". Ceci, nous a permis de retenir quatorze classes à savoir : eau ; bâtiments et infrastructure ; végétation naturelle ; céréales et fourrages ; maraîchage ; cultures industrielles ; arboriculture ; chêne-liège ; eucalyptus ; pin ; zone inondable ; rizière ; plantes hydrophiles et sol nu.

Des cartes produites illustrent notre approche.

**Mots-Clés:** Cultures, Sentinel, Landsat, classification supervisée, occupation du sol, périmètre du Loukkos

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: sacharki@uae.ac.ma

## Apport des images satellitaires Sentinel 1 et Landsat-8 OLI à l'extraction automatique des linéaments: application à la mine abandonnée de Zeïda (Maroc)

El Mehdi Benyassine <sup>\*1,2</sup>, El Mehdi Benyassine <sup>\*</sup>ψ

<sup>1</sup> ER Géoexplorations Géotechniques - BP. 11201, Zitoune, Meknès, Maroc

<sup>2</sup> Benyassine - Maroc

La mine de plomb de Zeïda est située au centre du bassin de la haute Moulouya, au NE du Maroc. Cette mine abandonnée, opérationnelle de 1972 à 1985, est un espace très impacté par l'activité minière et les déchets dont elle génère. Les terrains géologiques dans cette localité sont intensivement affectés par une fracturation hercynienne de différentes directions, ayant rejoué durant une phase post-hercynienne au cours du Mésozoïque. Ces fractures représentent des chemins préférentiels de la circulation des eaux de surface, potentiellement chargée en métaux lourds et en arsenic, vers la nappe profonde.

A l'aide des techniques de télédétection spatiale, les linéaments sont repérés par traitement mathématique des images satellites. L'objectif de ce travail est de comparer l'utilité les capteurs Landsat-8 OLI (optique) et Sentinel 1 (radar) dans l'extraction automatique des linéaments.

En plus des données d'images, l'approche suivie a incorporé l'utilisation des données de la carte géologique préexistante, le modèle numérique de terrain (MNT) et des fonds Google Earth. Le traitement de ces images est entièrement automatique et a consisté en une combinaison d'algorithme mathématique et une analyse en composante principale des nombres digitaux (DN) des pixels en position linéaire. Pour complément, les résultats obtenus par télédétection, des relevés de la fracturation par scanlines 1D ont été réalisés sur des surfaces fracturées le long de fronts de carrières.

La comparaison et la validation des résultats obtenus montrent que les données issues d'images Sentinel 1 sont plus efficaces dans la restitution des linéaments. Ceci montre la performance des données radar par rapport à celles optiques dans cette étude de cas.

**Mots-Clés:** Télédétection, Landsat, 8 OLI, Sentinel 1, Linéaments, Extraction automatique, Fracturation, Scanlines.

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: benyassine.elmehdi@gmail.com

## Using Sentinel-1 data to observe floods: case of French floods in May-June 2016

Christelle Bosc <sup>\*1</sup>, Lucie Chadourne-Facon <sup>2</sup>, Sébastien Rucquois <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pôle de compétences et d'innovation Applications satellitaires et télécommunications (PCI AST), Direction territoriale Sud-Ouest, Cerema (PCI-AST-CEREMA) - MEDDE - 1, avenue Colonel Roche, 31400 TOULOUSE, France

<sup>2</sup> Pôle de compétences et d'innovation Applications satellitaires et télécommunications (PCI AST), Direction territoriale Sud-Ouest, Cerema (PCI-AST-CEREMA) - MEDDE - France

The Lys basin in the North of France has to cope with an increasing number of flood phenomena these last years. With 180 000 persons exposed, the Mixed Water Management Syndicate of the Lys Basin (Symsagel) needs knowledge concerning these events to implement its Local Strategy for Flood Risk Management (SLGRI) in relation with the European Floods Directive. Terrain surveys are practiced during events but only punctually (in time and space) and essentially on urban areas. Rural areas are poorly or not monitored whereas they strongly contribute to hydraulics mechanisms potentially responsible of increasing impacts. Large scale data is necessary to cover this fairly large basin (1800 km<sup>2</sup>) and river segment of 195 km length. Cloud cover in this territory often prevents aerial acquisitions during flood events. Alternative solutions are necessary to obtain information at the basin scale to understand hydraulic mechanisms and propose planning actions in the context of PAPI (Action Plan and Flood Prevention), part of the SLGRI.

In May-June 2016, a large scale flood event occurred in Northern France. Over the Lys Basin, very high precipitations occurred May the 30th and 31st, 2016 causing rapid flooding of the Lys River and its tributaries, followed on the 6th and 7th of June 2016 by a second less intense rainfall episode, which also raised the water level, flooding the plain (favored by soil saturation) causing over 27 000 000 euros direct damages. Three Copernicus images covered the Lys Basin: Sentinel 1-A images acquired the 31st of May, 4th and 7th of June; a Landsat-8 image acquired the 9th of June completing the dataset. Those images covered the whole basin.

Cerema (French Public Establishment with a Department in charge of Space applications for public policies), extracted information on flooded areas from those Sentinel 1 and Landsat images.

Maps produced presenting Sentinel 1 satellite-based analysis report all observed flooded areas of the basin, a result which has never been produced at this scale in this area. This exhaustivity put emphasis on unexpected flooded areas out of the "potential flooded area". This large scale analysis enabled to target the most exposed areas to floods (overflow, runoff or rising water) and where it would be appropriate to carry out complementary investigations to confirm or not their sensitivity to local practices. All this has been possible thanks to Sentinel 1 data: large scale coverage, independent of clouds.

Images acquisition, flooded area extraction method and other potential from Sentinel 1 data as water height, vulnerability of the territory will be exposed in this communication.

**Mots-Clés:** Sentinel 1, A, floods, flooded areas, risks, natural disaster, Lys Basin

\*Intervenant

## Apport des données Sentinel-1 pour le suivi temporel de la végétation

Pierre-Louis Frison <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire en Sciences et Technologies de l'Information Géographique (LaSTIG) - UPEM - Université Paris-Est Marne-la-Vallée - France

Le suivi des variations saisonnières des paramètres de surface nécessite des données acquises avec une haute fréquence temporelle. Des études passées ont montré l'importance de cette dernière, notamment en tirant profit des mesures radar acquises par les diffusiomètres à bord par exemple des satellites ERS ou METOP [1-4]. Les acquisitions réalisées avec un pas de temps de 1 à 5 jours ont montré leur potentiel pour le suivi temporel des paramètres de surface. La basse résolution spatiale (de 10 à 50 km) de ces données les destine à des applications à l'échelle régionale ou globale.

La mission Sentinel-1 permet pour la première fois de bénéficier de données radar à haute résolution (20 m) avec une fréquence temporelle d'acquisition de 12 jours, sur la période allant de mars 2015 à août 2016 lorsque Sentinel-1A opère seul, et 6 jours depuis septembre 2016 en combinant les acquisitions Sentinel-1A et 1B. En plus de l'estimation du coefficient radar de rétrodiffusion, les acquisitions Sentinel-1 permettent d'extraire la cohérence interférométrique entre deux acquisitions consécutives,  $\rho$ , qui permet d'améliorer la discrimination des différents types de végétation [5-7]. Cette présentation porte sur l'analyse des signatures temporelles de ces 2 paramètres ( $\sigma_0$  et  $|\rho|$ ) observées sur végétation, typiquement des forêts tempérées et des zones agricoles.

**Mots-Clés:** radar, végétation, Sentinel, 1, signatures temporelles

<sup>\*</sup>Intervenant

## Couverture globale de Taiwan par InSAR pour le suivi des déformations de surface

Bénédicte Fruneau <sup>\*1</sup>, Erwan Pathier <sup>2</sup>, Marie-Pierre Doin <sup>2</sup>, Jyr-Ching Hu <sup>3</sup>, Hsin Tung <sup>3</sup>,  
Maryline Le Béon <sup>4</sup>

<sup>1</sup> LaSTIG – Université Paris-Est – France

<sup>2</sup> Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) – Université Joseph Fourier - Grenoble 1, Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

<sup>3</sup> National Taiwan University [Taiwan] (NTU) – Taïwan

<sup>4</sup> National Central University (NCU) – Taïwan

L'île de Taiwan, localisée à la frontière de deux plaques tectoniques convergeant à un taux de 8,1 cm/an est l'une des régions sismiques les plus actives dans le monde. Si l'étude du risque sismique y est importante, les phénomènes d'instabilités et risques gravitaires associés ne sont pas à négliger. Malgré une densité de mesures GPS et sismologiques exceptionnelle, seules les grandes lignes de la déformation (convergence, extension au NE), sont accessibles : la résolution spatiale est insuffisante dans le contexte géologique complexe de Taiwan pour déterminer les structures individuelles et leur interaction. L'InSAR permet d'accroître significativement l'information spatiale de la mesure de déplacements sur l'île entière. Nos précédentes études, basées sur le traitement interférométrique de données ERS, Envisat, et ALOS-1 sur plusieurs zones clés de Taiwan ont montré les potentialités de la méthode.

Nous proposons maintenant d'établir une cartographie complète et homogène des déformations de surface sur toute l'île par interférométrie radar, en exploitant toutes les données disponibles depuis 2007, à savoir les images des satellites ALOS-1, et des satellites plus récents ALOS-2, et Sentinel-1. Pour ce faire, nous utilisons les derniers développements interférométriques offerts par la chaîne de traitement NSBAS développée à ISTerre. Ces données sont calibrées en utilisant les données GPS et de nivelllement disponibles. Cette cartographie, complétée par des séries temporelles de déplacement sur plusieurs périodes (allant de 2007 à 2018) en fonction des images disponibles, est une donnée cruciale dans la surveillance des déformations actives de l'île, et l'évaluation des risques.

Nous exploitons aussi cette cartographie pour aborder des problématiques liées au cycle sismique dans plusieurs zones de Taiwan en particulier le Sud-Ouest, et la Vallée Longitudinale. Dans le Sud-Ouest, sur la période 2007-2011, l'InSAR nous permet de détecter de nouvelles structures actives, non cartographiées jusqu'à présent, dont une en particulier qui a été activée lors du séisme de Meinong (5 février 2016, Mw 6.4). Dans la zone de Tainan, nous pouvons également constater le changement de comportement de l'anticinal de Tainan, qui se soulevait régulièrement à une vitesse d'1cm/an sur la période 1996-1999.

A l'Est, dans la Vallée Longitudinale, la situation géologique est relativement plus simple, dominée par une seule grande faille, certes segmentée, mais dont le glissement domine le signal tectonique. La carte de vitesse indique également une surrection rapide de la Chaîne Centrale au Sud de l'île. Cette surrection, déjà partiellement documentée par le GPS et le nivelllement est clairement cartographiée.

**Mots-Clés:** INSAR, ALOS, Sentinel1, Taiwan, déformation de surface

## Les données de télédétection optique et radar pour l'évaluation et le suivi des écosystèmes forestiers tropicaux : Étude de cas au Togo, en Guyane française et en République Dominicaine

Anoumou Kemavo <sup>\*1,2</sup>, Abdourrahmane Atto <sup>3</sup>, Cédric Lardeux <sup>1,2</sup>, Martin Rapilly <sup>4</sup>,  
Jean-Paul Rudant <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Est Marne-la-Vallée (UPEM) – France

<sup>2</sup> Office National des Forêts - ONF (FRANCE) – Office National des Forêts - ONF (FRANCE) – France

<sup>3</sup> Université Savoie Mont Blanc (USMB [Université de Savoie] [Université de Chambéry]) – , – France

<sup>4</sup> Université de Santo Domingo – République dominicaine

<sup>5</sup> Laboratoire en Sciences et Technologies de l'Information Géographique (LaSTIG) – UPEM - Université Paris-Est

Cette présentation propose d'explorer les potentialités des données de télédétection optique et radar libres d'accès pour la cartographie des classes d'occupation des sols dans les écosystèmes forestiers tropicaux, aux climats secs ou humides. L'analyse a porté sur la caractérisation des changements dans les strates d'occupation des sols et sur le suivi temporel des strates fragiles et vulnérables (forêts, mangroves). Différents sites tests situés dans ces écosystèmes ont été sélectionnés. Il s'agit de la réserve de biosphère de l'Oti-Keran-Mandourie (OKM) située dans la région des savanes au Togo, la zone située autour du pont faisant la liaison entre la ville de Saint-Georges de l'Oyapock en Guyane française et l'état d'Amapa au Brésil et la province de la Monté Cristi en république Dominicaine. Concernant les données de télédétection utilisées : pour les images radar, des séries temporelles Sentinel-1, des mosaïques Alos-2 et, pour les images optiques, Sentinel-2 et Landsat-8. D'autres données annexes ont également été utilisées : cartes d'occupation du sol, points GPS collectés lors des missions de terrain, modèles numériques de terrain (MNT-SRTM de 30m) ainsi que les données d'inventaires forestiers nationaux lorsque ceux-ci étaient disponibles. Notre approche a comporté des prétraitements réalisés sur les images optiques et radar de tous les sites accompagnés de traitements spécifiques sur chacun des sites. Les images optiques ont donné lieu à une fusion dite pan-chromatique (fusion des bandes panchromatiques les mieux résolues (taille de pixel de 10 m pour Sentinel-2 et 15 m pour Landsat) avec les bandes spectrales les moins résolues). Pour les images radar sentinel-1, les étapes successives de prétraitement, ont été : l'orthorectification basée sur un MNT SRTM, la calibration radiométrique et le filtrage spatio-temporel de Quegan. Les approches spécifiques, variables selon le site d'étude, ont comporté : la classification supervisée Random Forest (RF), une détection automatique de changements basée sur la décomposition en ondelette, une approche d'analyse diachronique par seuillage sur les classes de mangroves et de forêts. Les principaux résultats sont les suivants : Site de l'OKM : une classification menée sur une combinaison d'images optiques et radar donne de meilleures performances que des classifications menées sur des images optiques et radar considérées séparément. Sur le site de Saint-Georges de l'Oyapock, l'analyse temporelle menée à partir de décompositions en ondelettes, a permis de détecter trois grands types de changements. Sur le site de la province de Monté Cristi, l'analyse conjointe d'images radar et optiques a permis de proposer une cartographie comportant 18 classes d'occupation des sols, contrôlées sur le terrain avec une précision globale de plus de 90 %. Le suivi historique des forêts montre une régression de la couverture forestière. Parallèlement, nous observons une régression de la surface des mangroves entre 2015 et 2018.

## Suivi à haute fréquence temporelle de la mobilité des lits à partir des données ALOS et Sentinel

Eric Masson \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> TERRITOIRES VILLES ENVIRONNEMENT SOCIETE (TVES) – Université des Sciences et Technologies de Lille - Lille I : EA4477 – UFR Géographie et Aménagement Université de Lille Sciences et Technologies Avenue Paul Langevin 59650 Villeneuve d'Ascq, France

La constellation de satellites européens Sentinel déployée par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) depuis 2013 offre une observation des surfaces terrestres inégalée tant pour la recherche que pour la gestion des grands fleuves. L'accessibilité à des données radar et optique, à haute résolution spatiale et temporelle, ainsi qu'à un logiciel (SNAP) d'exploitation permet en effet une très nette amélioration du suivi des dynamiques fluviales parmi lesquelles les événements extrêmes. Notre proposition de s'appuie sur une analyse comparative du potentiel des données Sentinel et ALOS appliquée à la dynamique fluviale de la rivière Kosi à la frontière Népal-Indienne. Nous verrons notamment que les données optiques et radar sont complémentaires et que leur traitement permet le suivi des évolutions des chenaux fluviaux et des sédiments mais aussi d'anticiper des maintenances d'ouvrages de protection ou leur vulnérabilité à une rupture potentielle. Pour démontrer cette utilité nous étudierons la crue d'août 2008 et la trajectoire spatio-temporelle de la dynamique fluviale de la rivière Kosi à l'aide des données ALOS sur la période 2007-2016. Puis, sur une période plus récente (2016-2017), nous démontrerons ensuite les apports des données Sentinel pour l'observation et le suivi de la dynamique fluviale sur cette rivière.

**Mots-Clés:** ALOS, Sentinel, Crue, Dynamique fluviale, Rivière Kosi

\*Intervenant

## Synergistic approach for monitoring of land cover of Mekong delta using Sentinels -1 and 2 data with object-based machine learning algorithms

Chi Nguyen Lam <sup>\*</sup>, Simona Niculescu <sup>1</sup>, Bernard Pottier <sup>2</sup>, Hiep Xuan Huynh <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique (LETG) – Université de Caen Normandie, Université d'Angers, Université de Nantes, Ecole Pratique des Hautes Etudes, Université de Brest, Université de Rennes 2, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR6554 – France

<sup>2</sup> LabSticc – , – France

<sup>3</sup> Université de Can Tho – Vietnam

In this work the synergistic use of Sentinel-1 and 2 are combined in the context of land use/cover (LULC) mapping in Mekong delta. The objective was to develop a new Object-based Image Analysis (OBIA) approach for mapping wetland areas using Sentinel-1 and 2 data. The two popular machine learning algorithms (Support Vector Machines-SVMs and Random Forests- Fs) are used and their results are compared. Results showed that two-part image segmentation could efficiently create object features across the study area. For both classification algorithms, an increase in overall accuracy was observed when the full synergistic combination of available datasets. A statistically significant difference in classification accuracy at all levels between SVMs and RFs was also reported, with the latter being up to 85% higher.

<sup>\*</sup>Intervenant

## Machine learning vs random forest : Applications sur des données Sentinel en zones côtières

Simona Niculescu <sup>\*1</sup>, Cédric Lardeux <sup>2,3</sup>, Dino Linco <sup>4</sup>, Jenica Hanganu <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique (LETG) – Université de Caen Normandie : UMR6554 – France

<sup>2</sup> Office National des Forêts – Office National des Forêts - ONF (FRANCE) – France

<sup>3</sup> Université Paris-Est Marne-la-Vallée (UPEM) – Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique – France

<sup>4</sup> Maison de la télédétection – UMR Tetis – France

<sup>5</sup> Roumanie – Roumanie

Cette contribution compare deux algorithmes appliqués à la classification de zones humides côtières. Une première application concerne l'évaluation de zones restaurées dans le delta du Danube à travers l'application de Random Forest à partir des images Sentinel-1 et -2 et, la deux- ième application consiste dans l'évaluation de l'algorithme Random Forest en comparaison avec la méthodologie Deep Learning en matière de suivi et analyse de la couverture végétale de la zone côtière du delta du Danube.

Pour suivre l'évolution de la couverture végétale des zones restaurées, des images satellites radar et optique de dernière génération ont été utilisées, tel que Sentinel-1 et Sentinel-2. La multipolarisation et la multifréquence radars sont également utilisées pour la classification de la végétation des zones humides en fonction de leur longueur d'onde, polarisations et mécanisme de rétrodiffusion, qui sont associés à la densité et la taille de la végétation. En même temps, le coefficient de rétrodiffusion a été étudié sur les deux polarisations différentes en fonction d'un ensemble de paramètres liés, d'une part, aux caractéristiques du RSO (fréquence, polarisation et géométrie d'acquisition) et de l'autre aux propriétés de la cible (structure géométrique, constante diélectrique, biomasse, etc.). Dans un deuxième temps, nous avons effectué des classifications Random Forest de synthèse entre toutes les dates radar Sentinel-1 et ensuite, des combinaisons avec l'image Sentinel-2. Les résultats de cette première partie de l'étude portent sur des combinaisons de données provenant de différents capteurs (satellite Sentinel-1 multi-date, Sentinel-2) afin d'améliorer la précision de reconnaissance et de cartographie des grandes classes de végétation dans la restauration de zones dans le Delta du Danube. Tout d'abord, les données de chaque capteur sont classées et analysées. Les résultats montrent des performances de classification moyen (87,5 % précision moyenne pour les multi-dates images radar classification ; 95,7 % pour une seule image optique) dans cette première étape. La combinaison de Sentinel-1 multi-dates et données optique Sentinel-2 l'amélioration de la performance de la classification (97,1 %). Dans la deuxième partie de ce travail, l'approche spatiale s'appuie sur les nouvelles technologies et méthodologies d'analyse spatiale : l'apprentissage en profondeur de Sentinel-1 multi-temporel. Dans cette partie du travail, nous proposons un réseau d'apprentissage profond pour la classification d'images qui exploite les caractéristiques multi-temporelle de nos données. Le modèle que nous utilisons Gated Recurrent Unit (GRU) Réseau, une sorte de réseau de neurones récurrents, qui prend explicitement en compte la dimension temps via un mécanisme de gating pour effectuer la prédiction finale. La principale qualité du GRU réseau est sa capacité à ne considérer que la partie importante de l'information provenant de la suppression des données temporelles l'information non pertinente

<sup>\*</sup>Intervenant

## Perception qualitative et quantitative du relief dans les images Radar : aspects généraux et spécificités du capteur Sentinel1

Jean-Paul Rudant \*<sup>1</sup>, Pierre-Louis FRISON, Bénédicte FRUNEAU

<sup>1</sup> Université Paris-Est Marne-la-Vallée (UPEM) – France

Les données des radars imageurs sont particulièrement sensibles à la présence de relief. Pour un pixel donné, l'intensité rétrodiffusée, mesurée par l'antenne, dépend de la nature de la surface imagée et des pentes locales. Les déformations géométriques observées dans les images dépendent de la direction de visée et de l'altitude des cibles. La phase, pour un pixel, dépend de la géométrie d'acquisition, donc en particulier, de l'altitude du point imagé. De ces diverses propriétés relatives à l'intensité, à la géométrie des images et à la phase, découlent respectivement plusieurs techniques pour appréhender le relief grâce aux images radar : radarclinométrie, radargrammétrie et interférométrie. Dans cette présentation, nous décrirons successivement ces 3 techniques, en présentant les fondements physiques ainsi que divers exemples. Puis nous nous focaliserons sur Sentinel1 pour prendre en compte les caractéristiques spécifiques de ce capteur, en terme de longueur d'onde, de polarisation et de géométrie d'acquisition.

**Mots-Clés:** télédétection radar, relief, geomorphologie, radarclinométrie, radargrammétrie, interférométrie

\*Intervenant



## 5. LE SYSTEME MANCHE / MER DU NORD

## Déformation cénozoïque polyphasée dans le Centre-Cotentin (Normandie, France)

Olivier Dugue <sup>\*1</sup>, Florence Quesnel <sup>2,3</sup>, Benabdellouahed Massinissa <sup>4</sup>, Fabien Paquet <sup>2</sup>,  
Bernadette Tessier <sup>1</sup>, Chantal Bourdillon <sup>5</sup>, Frédéric Gresselin <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C) – Normandie Univ, UNICAEN, UNIROUEN, CNRS : UMR6143  
– 14000 Caen, France

<sup>2</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) – Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM),  
CNRS : UMR7327, Université d'Orléans – 3, Avenue Claude Guillemin, BP 36009, F 45060 Orléans Cedex 2, France

<sup>3</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans - UMR7327 (ISTO) – Bureau de Recherches Géologiques et Minières :-  
Campus Géosciences 1A, rue de la Férollerie 45071 Orléans cedex 2, France

<sup>4</sup> Domaines Océaniques (LDO) – Université de Bretagne Occidentale (UBO), Institut Universitaire Européen de la  
Mer (IUEM), CNRS : UMR6538 – 29280 Plouzané, France

<sup>5</sup> Stratigraphie et biochronologie – Stratigraphie et biochronologie – France

<sup>6</sup> Université de Caen Normandie (UNICAEN) – Université de Caen Normandie – France

Le Centre-Cotentin situé au NW de la Normandie et sur la marge Atlantique orientale a conservé une épaisse série marine (environ 300 m), caractérisée par plusieurs épisodes transgressifs de sables et graviers calcaires coquilliers tidaux (faluns) datés de l'Éocène moyen-supérieur, du Miocène moyen et du Pliocène supérieur-Péistocène inférieur. Ces dépôts marins sont séparés par des lacunes qui sont la conséquence de phases régressives ou de déformations compressives "alpines" s.l. durant tout le Cénozoïque.

À la faveur de nombreux forages à la tarière, le lever de la feuille de Sainte-Mère-Église a permis de préciser les relations géométriques complexes entre les formations crétacées et cénozoïques dans le bassin cénozoïque de Picauville-Orglandes. Ce dernier se raccorde aux autres petits bassins cénozoïques trouvés dans le Centre-Cotentin (Néhou, Saint-Sauveur-le-Vicomte, Carentan, Sainteny, Marchésieux,...), et l'ensemble présente de nombreuses similitudes lithologiques, sédimentologiques, faunistiques et paléogéographiques.

La géométrie du bassin cénozoïque du Centre-Cotentin peut être schématisée comme un quadrilatère d'environ 20 km de large sur 35 km de long, limité à l'Ouest et à l'Est, par des failles d'orientation N 150-170 et compartimenté par des failles d'orientation N 60-70. Il est structuré par des failles d'origine hercynienne dont le rejet explique la subsidence, dans un contexte en distension, entre le Permo-Carbonifère et le Crétacé, puis en compression, de l'Éocène au Miocène.

Au Cénozoïque, plusieurs déformations compressives majeures à grand rayon de courbure ont été distinguées, entre le Paléocène et l'Éocène inférieur et au Péistocène moyen et supérieur, dans les bassins du Centre-Cotentin. Elles expliquent le soulèvement répété et l'émergence du Cotentin, puis l'érosion de sa couverture mésozoïque. D'autres déformations moins intenses interviennent à la fin de l'Éocène supérieur avec des ondulations dans des calcaires éocènes, puis entre l'Oligocène inférieur et le Miocène moyen, avec une érosion des terrains.

Certaines des érosions, lacunes et déformations inventorierées dans le Cotentin sont retrouvées en mer de la Manche, dans ses approches occidentales ou en mer du Nord.

**Mots-Clés:** tectonique, Cénozoïque, Normandie, mer de la Manche

## Evolution tectono-stratigraphique cénozoïque de la Manche orientale et des zones adjacentes : étude du Bassin de Dieppe-Hampshire méridional

Martin Jollivet-Castelot <sup>\*1</sup>, Justine Briais <sup>2</sup>, Fabien Paquet <sup>2</sup>, Virginie Gaullier <sup>1</sup>, Cécile Allanic <sup>2</sup>, Frank Chanier <sup>1</sup>, Olivier Averbuch <sup>1</sup>, Isabelle Thinon <sup>2</sup>, Jean-Jacques Chateauneuf <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - Université de Lille, Université Littoral Côte d'Opale, CNRS : UMR8187 - France

<sup>2</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), - France

<sup>3</sup> Consultant en biostratigraphie - 8 quai du Châtelet, F45000 Orléans, France - France

La Manche orientale a été affectée et façonnée depuis le Mésozoïque par des événements tectoniques localisés le long de limites de plaques (ouverture de l'Océan Atlantique Nord, orogenèses pyrénéenne et alpine). Actuellement, le Bassin de Dieppe-Hampshire correspond à un synclinal NW-SE traversant la Manche dans sa partie orientale. Les états de contraintes extensif puis compressif dans cette région ont impliqué la réactivation des structures régionales majeures, principalement héritées de l'orogenèse varisque. Bien que le cadre structural général soit accepté, les géométries 3D des structures affectant la couverture sédimentaire Cénozoïque restent peu documentées, et par conséquent le timing associé également.

Les nouvelles données sismiques de très haute résolution (Sparker) acquises au cours des campagnes océanographiques " TREMOR " (2014) et " TREMOR 2 " (2017) et de nouveaux carottages (" TREMOR 2 ") offrent de nouvelles perspectives sur l'évolution structurale de la Manche orientale. Un cadre stratigraphique précis pour le Paléogène du Bassin de Dieppe-Hampshire peut être posé, et les épisodes de déformation cénozoïques peuvent être mis en évidence à partir de la corrélation des discontinuités majeures avec les bassins adjacents (sud de l'Angleterre, Bassin de Paris et Belgique).

Ainsi, il apparaît que le développement du synclinal de Dieppe-Hampshire, orienté NW-SE, s'initie à la base du Bartonien conjointement au soulèvement des régions voisines. De plus, la forte densité de la couverture sismique permet de cartographier de manière détaillée les différents éléments structuraux (failles, flexures, plis) et d'analyser leurs connexions spatiales respectives (recoupements, branchements, etc...). Au sein du synclinal de Dieppe-Hampshire, le schéma structural révèle deux directions structurales majeures, orientées E-W et NW-SE, toutes deux affectant des séries syn- à post-bartoniennes, attestant donc leur caractère synchrone et du partitionnement horizontal de la déformation.

La corrélation des structures surface/profondeur grâce à la géophysique permet également de mettre en évidence le partitionnement vertical de la déformation et met en évidence le rôle primordial de l'héritage structural varisque sur le schéma structural final.

**Mots-Clés:** Manche orientale, Bassin de Dieppe Hampshire, Stratigraphie sismique, Evolution structurale

<sup>\*</sup>Intervenant

## One network may hide others – toward a comprehensive scenario for neogene superimposed valley networks along the English Channel

Fabien Paquet <sup>\*1</sup>, Isabelle Thinon <sup>1</sup>, Eric Lasseur <sup>1</sup>, Justine Briais <sup>1</sup>, Olivier Dugué <sup>2</sup>,  
Bernadette Tessier <sup>2</sup>, Virginie Gaullier <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) – Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – 3 avenue Claude Guillemin F45060 Orléans, France

<sup>2</sup> Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C) – Normandie Univ, UNICAEN, UNIROUEN, CNRS : UMR6143 – 14000 Caen, France

<sup>3</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – Université Lille I - Sciences et technologies, CNRS : UMR8187 – 59655 Villeneuve d'Ascq, France

The English Channel has been an area of intense geological investigation for decades, spanning various subjects such as structural and basin evolution between variscan and alpine orogenic cycles or sediment transport over a wide platform under tidal and storm currents. Among these subjects, one specific and noticeable feature of the English Channel is the occurrence of a complex network of channels with clear morphological expression at the seabed. Since the beginning of the 20th century, and more pragmatically since the 1970s and the development of high-resolution seismic acquisition, this network has been the focus of several studies that proposed various scenarios for its origin and age. The existence of two superimposed networks had already been proposed in the late 70's by Alduc. Since 2007, in the framework of the geological mapping of the French continental shelf, BRGM and collaborators (University of Caen Basse-Normandie/UMR M2C; University of Lille 1/UMR LOG,...) acquired a dense grid of very high resolution marine seismic data. Interpretation of these data (i) confirms that several networks are superimposed, and (ii) details the real complexity and discontinuity of the older network(s) associated to the "Fosses de la Manche" system. Finally, thanks to high quality oil exploration seismic data, we were able to reveal a local unexpected increase of bedrock incision and associated sedimentary fill up to c. 350 m. These observations and subsequent implications for networks origin (fluvial or tidal) and development are discussed with respect to regional geological settings and controlling parameters. Their significance in terms of source-to-sink features is a key aspect as the English Channel is certainly an important zone of sediment transfer during Neogene, collecting from a large catchment and delivering to the Western Approaches, the Celtic Sea and the Bay of Biscay abyssal plains. Drilling selected targets to provide groundtruthing sounds now like the obvious next step.

**Mots-Clés:** Stratigraphy, incisions, networks, Neogene, English Channel

<sup>\*</sup>Intervenant

## Héritage morphostructural du drainage quaternaire dans un bassin versant côtier : l'exemple des marais de Vimont (Normandie, France)

Loïk Poignant <sup>\*1,2</sup>, Olivier Dugué <sup>1,2</sup>, Bernard Delcaillau <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C) – Normandie Univ, UNICAEN, UNIROUEN, CNRS : UMR6143  
– 14000 Caen, France

<sup>2</sup> M2C – CNRS : UMR6143 – France

Dans le bassin versant côtier de la Manche, à la frontière des terrains peu déformés du Bassin parisien, à l'Est et des séries précambriennes et paléozoïques plusieurs fois déformées du Massif armoricain, à l'Ouest, les fleuves Orne et Dives ont incisé la couverture mésozoïque, le socle varisque et cadomien, à la fin du Cénozoïque. Ils ont préservé un système de terrasses fluviatiles étagées attribuées au Pléistocène (Jamet, 2015). L'incision weichsélienne de la Dives atteint l'altitude -20 m au droit de son actuelle embouchure, en mer de la Manche. Au cours de la remontée du niveau marin à l'Holocène, plusieurs systèmes marécageux se sont développés en domaine côtier. Si les marais de la Dives répondent à un modèle classique d'un épais remplissage argilo-tourbeux holocène (environ 20 m) dans une vallée incisée vers la fin du Cénozoïque, la dépression située plus en amont, dans les marais de Vimont est plus délicate à expliquer. Les dépôts holocènes sont moins épais (2 m) et les marais de Vimont se prolongent dans ceux de la Dives par une cluse à travers la cuesta callovienne. Des études géomorphologiques liminaires du bassin versant et du réseau hydrographique ont démontré que les marais de Vimont correspondent à une dépression de 3 à 5 km de rayon, creusée dans les calcaires bathoniens de la campagne de Caen (Poignant, 2017). L'origine de cette cuvette morphologique qui draine le cours de la Muance restait à comprendre : incision fluviatile pléistocène ou héritage structural ?

Différentes campagnes gravimétriques, menées entre 1956 et 2010 ont prolongé l'extension des synclinaux varisques de direction N 110, sous la couverture mésozoïque du Calvados (synclinaux de Ranville, May, Urville et zone bocaine). La cartographie géologique de ce secteur reconnaît les failles majeures dont certaines se prolongent vers le Nord, en baie de Seine (Benabdellouahed, 2012). Les terrains bajo-bathoniens de la campagne de Caen sont affectés par des rejeux tertiaires de failles varisques N 110 ou cadomiennes N 70. D'autres directions conjuguées de failles N 20, N 90 et N 170 sont décrites sur les platiers rocheux ou en carrières. La révision stratigraphique de quelque 3 000 forages archivés dans la BSS a permis la production de cartes d'isobathes pour les séries jurassiques du Bessin et de la campagne de Caen-Falaise. Elles démontrent l'existence de déformations plicatives à grand rayon de courbure (10 à 15 km), selon des amplitudes décamétriques (10 à 50 m) et une direction N 70. Elles s'amortissent à proximité des structures varisques. Les marais de Vimont sont mis en place dans la plus importante synforme déformant le substratum du Dogger de la campagne de Caen et contrôlant l'organisation du réseau de drainage cénozoïque. L'âge des ces déformations plicatives est au moins tertiaire, un rejet plus ancien étant encore difficile à prouver.

**Mots-Clés:** Normandie, marais holocènes, bassin versant côtier, déformations tertiaires

## Physiographie et nouvelle extension des systèmes turbiditiques profonds du paléo-fleuve Manche

Marjolaine Sabine <sup>\*1</sup>, Sébastien Zaragosi <sup>\*1</sup>, Frédérique Eynaud <sup>1</sup>, Jean-François Bourillet <sup>2</sup>,  
Samuel Toucanne <sup>3</sup>, Linda Rossignol <sup>1</sup>, Thierry Garlan <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Université de Bordeaux, UMR CNRS 5805 EPOC (EPOC) – Université de Bordeaux (Bordeaux, France) – France

<sup>2</sup> Unité de recherche Géosciences Marines (Ifremer) (GM) – IFREMER – France

<sup>3</sup> Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER - Technopôle Brest Iroise - Plouzané, France

<sup>4</sup> Shom (Shom) – EPA Shom – 13 rue du Chatellier 29200 BREST, France

Durant les bas niveaux marins pléistocènes, un vaste système fluviatile a drainé le continent européen, le paléofleuve Manche (Gibbard, 1988). Ce système se terminait en un delta sur le plateau continental nord Gascogne (Toucanne et al., 2012) et se jetait dans le golfe de Gascogne pour former les systèmes turbiditiques celtique et armoricain (Zaragosi et al. 2000, 2001). Les études antérieures portant sur ces systèmes turbiditiques n'ont jamais permis d'atteindre leurs parties terminales et ce uniquement en raison de l'absence de données bathymétriques multi-faisceaux dans ces zones. Afin de connaître leurs extensions réelles nous avons compilé des données acoustiques (SMF et sismiques CHIRP) issues de valorisations de transits des navires du SHOM et de l'IFREMER ainsi que des données bathymétriques disponibles par le réseau européen EMODNET. Les données collectées lors de la mission SEDIVAL (n. o. *Pourquoi Pas ?* 2010 ; sondeur multifaisceau, sismique CHIPR et carottages Calypso) portant sur l'étude du bassin de l'Union, bassin située à l'extrême sud du système turbiditaire celtique ont également été utilisées. Nos résultats montrent que l'extension des éventails turbiditiques du golfe de Gascogne va bien au-delà des zones précédemment cartographiées. Ces systèmes recouvrant même la totalité des environnements profonds du golfe. Leurs lobes distaux se rejoignent au nord-ouest de la marge ibérique. À leur extrémité, des incisions précédemment cartographiées à l'ouest du cap Finisterre (Thêta Gap ; Laughton, 1968) semblent correspondre à un réseau de chenaux connectant le golfe de Gascogne à la plaine abyssale ibérique. Il est alors fort probable que les dépôts terminaux du paléofleuve Manche atteignent la marge portugaise et la plaine abyssale ibérique.

Gibbard, P. L. "The History of the Great Northwest European Rivers During the Past Three Million Years." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* 318 no 1191 559–602. doi:10.1098/rstb.1988.0024

Laughton, A.S., 1968. New evidence of erosion on the deep ocean floor. *Deep Sea Res. Oceanogr Abstr.* 15, 21–29. doi:10.1016/0011-7471(68)90026-0

Toucanne, Samuel, et al. "External Controls on Turbidite Sedimentation on the Glacially-Influenced Armorican Margin (Bay of Biscay Western European Margin)" *Marine Geology* 303–306 (2012) 137–53 doi:10.1016/j.margeo.2012.02.008

Zaragosi, S., 2000. Physiography and recent sediment distribution of the Celtic Deep-Sea Fan, Bay of Biscay. *Marine Geology* 169, 207–237. https://doi.org/10.1016/s0025-3227(00)00054-2

Zaragosi, S., et al. 2001. The deep-sea Armorican depositional system (Bay of Biscay), a multiple source, vamp model *Geo-Marine Letters* 20, 219–232

**Mots-Clés:** Paléo, fleuve Manche, Golfe de Gascogne, Système turbiditaire



## **6. AUX FRONTIERES DE LA GEOLOGIE, PLANETOLOGIE, SYSTEME SOLAIRE, UNIVERS**



## Poussières cométaires : Antarctique et missions spatiales

Cécile Engrand

Centre de Sciences Nucléaires et de Sciences de la Matière (CSNSM) - CNRS : UMR8609, Université Paris Saclay - France

Les comètes sont des petits corps du Système Solaire ayant préservé la matière présente dans les zones froides du disque protoplanétaire. La caractérisation des comètes peut être effectuée à distance par des observations astronomiques à l'aide de télescopes toujours plus performants, et des missions spatiales dédiées à l'étude des comètes ont aussi récemment permis d'avancer dans la compréhension de la composition et des processus de formation de ces petits corps. C'est le cas de la mission Rosetta (ESA) qui a accompagné la comète Churyumov-Gerasimenko de 2014 à 2016 et de la mission spatiale Stardust (NASA) qui a rapporté des échantillons de la comète Wild 2 en 2006. Des échantillons cométaires peuvent également être trouvés dans la collecte de micrométéorites Concordia (CSNSM) réalisée dans les neiges des régions centrales antarctiques (Station Concordia à Dôme C, instituts polaires IPEV-PNRA).



## Climats, glaciers et rivières sur les autres planètes

François Forget

Laboratoire de Meteorologie Dynamique (LMD, IPSL) – CNRS : UMR9539 – Universite P. et M. Curie, BP99 4 place Jussieu, 75005 Paris, France

Parmi les nombreux corps du système solaire, six possèdent une atmosphère en interaction avec la surface : La Terre, Mars, Venus, Titan (une lune de Saturne), Triton (autour de Neptune) et Pluton. Sur ces mondes, la surface est en partie façonnée par des processus climatiques éoliens, fluviaux ou glaciaires, riches d'enseignements sur notre planète et même sur la diversité des environnements possibles sur les exoplanètes.



## Poussières du disque protoplanétaire : l'enregistrement des météorites primitives

Hughes Leroux

Unité Matériaux et Transformations - UMR 8207 (UMET) – Institut National de la Recherche Agronomique :  
UMR0638, Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8207 – France

Les objets du système solaire (planètes, astéroïdes, comètes) se sont formés par accrétion de matière solide finement divisée. Dans certains petits objets, cette matière a survécu, au moins partiellement, aux différents processus de transformation de la matière dans les planétésimaux. Dans cet exposé, on se propose de faire un état des lieux de cette matière en focalisant sur la fraction la plus fine (et néanmoins abondante) contenu dans des météorites dites " primitives ".



## L'exploration spatiale des petits corps du Système Solaire: des retours d'échantillons aux tests de déviations d'astéroïdes

Patrick Michel

Joseph Louis LAGRANGE - Université Nice Sophia Antipolis, Observatoire de la Côte d'Azur - France

En 2018, des défis fabuleux nous attendent dans le cadre de l'exploration des astéroïdes, avec des premiers résultats qui bouleversent déjà notre compréhension de ces petits corps fascinants. Deux missions spatiales, Hayabusa2 (JAXA) et OSIRIS-REx (NASA) rendent visite à deux astéroïdes potentiellement riches en matière organique afin d'en ramener un échantillon sur Terre et ainsi vérifier notamment le rôle de ces briques restantes de la formation des planètes dans l'émergence de la Vie sur Terre. L'ESA étudie la mission Hera, composante européenne de la mission AIDA en collaboration avec la NASA, qui consiste à effectuer pour la première fois un test en grandeur nature de déviation d'un astéroïde par l'impact d'un projectile artificiel afin de vérifier notre aptitude à dévier des cailloux de 100-200 m de diamètre potentiellement dangereux et ainsi d'être prêt le jour où un risque de collision d'astéroïde se confirmera. Ces trois missions, dignes des aventures d'Indiana Jones, ont le potentiel d'inspirer les jeunes générations et leur donner le goût des défis et de la connaissance. Nous les passerons en revue ainsi que nos connaissances actuelles sur ces petits corps et les défis qui nous attendent.



## La formation de la Terre

Alessandro Morbidelli

Joseph Louis LAGRANGE – Université Nice Sophia Antipolis, Observatoire de la Côte d’Azur – France

L’analyse de la composition chimique de la Terre et la modélisation de la formation planétaire donnent désormais une vision assez cohérente sur comment notre planète est née, l’origine de son eau, des autres éléments volatils (y compris les gaz rares) et des éléments sidérophiles, la chronologie de son accrétion. Nous ferons le point sur les avancées récentes à ce sujet.



## Le Robot Curiosity : 6 années de voyage sur Mars à la recherche du passé perdu de la Terre

Violaine Sautter

Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie (IMPMC) – Museum National d'Histoire Naturelle, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6 : UM120, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR206, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7590 – Tour 23 - Barre 22-23 - 4e étage - BC 115 4 place Jussieu 75252 PARIS, France

Depuis l'atterrissement sans faute du robot Curiosity, le 6 Aout 2012, au fond du cratère de Gale situé non loin de l'équateur martien, 18km ont été parcourus à une vitesse de "pointe" de 100m/h. Il a atteint il y a deux ans à peine son objectif ultime la montagne d'argile et de sulfate, le mont Sharp de 5000m de haut, au centre du cratère. Une semaine sur deux, les laboratoires de Toulouse (l'IRAP), Paris (le laboratoire de l'IMPMC au Muséum) et de Nantes pilotant le laser ChemCam situé en haut du mat, sont en contact direct avec le sol martien.

La moisson de résultats est extraordinaire. Après plus de 500 mille tirs laser et une campagne photographique exceptionnelle (17 caméras embarquées) nous avons identifié des lits de rivière fossile, des dépôts lacustres, des minéraux hydratés riches en fluor et en manganèse. Si tous les instruments convergent pour dire que la planète Mars a été par le passé habitable, ChemCam a découvert associés aux basaltes des roches surprenantes d'affinité granitiques mais aussi des trachytes, des trachyandesites, des sédiments riches en silicium et potassium témoignant d'une différentiation précoce de la croûte primitive martienne il y a plus de 4 milliards d'années.



## Caractérisation des lunes-océans de Jupiter et de Saturne

Gabriel Tobie

Laboratoire de Planétologie et Géodynamique (LPG) - CNRS : UMR6112, INSU, Université de Nantes - France

L'exploration des systèmes de Jupiter et Saturne par les missions Galileo (1996-2003) et Cassini-Huygens (2004-2017) a révélé que plusieurs lunes autour de Jupiter (Europe, Ganymède, et Callisto) et autour de Saturne (Titan, Encelade) abritent un océan d'eau salée sous leur surface glacée. En passant à travers le panache de vapeur et de grains de glace émis au pôle sud d'Encelade, la sonde Cassini a procédé pour la première fois à l'analyse de matériaux provenant d'un océan extraterrestre. Ces analyses ont révélé qu'Encelade possède tous les ingrédients nécessaires à l'émergence de la vie. Même s'il n'existe pas encore de preuve directe, des conditions favorables pourraient également exister dans les océans d'Europe, Ganymède et Titan, qui seront caractérisés par des futures missions d'exploration en cours de développement à l'ESA (JUpiter ICy moon Explorer) et à la NASA (Europa Clipper, Dragonfly). Même si le potentiel exobiologique de ces lunes-océans est prometteur, à l'exception d'Encelade, leurs environnements océaniques sont encore peu contraints. Dans cette présentation, après une aperçu des connaissances actuelles de ces lunes-océans, je présenterai comment les explorations futures et les travaux de modélisation et expérimentaux nous permettront de mieux contraindre les conditions physico-chimiques régnant au sein de ces océans cachés. En particulier, je discuterai de quelle manière les effets de marée peuvent créer des conditions propices à la mise en place d'activité hydrothermale sur le plancher océanique, augmentant le potentiel exobiologique de ces lunes-océans.



## 7. PALEOCLIMATOLOGIE ET PALEOENVIRONNEMENT



## 7.1. Climatologie et paléoclimatologie

## Empirical modelling of precipitation and erosion susceptibility using lacustrine proxies

Deonie Allen <sup>\*1</sup>, Anaëlle Simonneau <sup>2</sup>, Stephane Binet <sup>1,2</sup>, Gaël Le Roux <sup>1</sup>, Didier Galop <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Ecologie Fonctionnelle et Environnement, Université de Toulouse (EcoLab) – CNRS : UMR5245 – France

<sup>2</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans - UMR7327 (ISTO) – Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

<sup>3</sup> GEODE, Géographie de l'Environnement, CNRS, Université Jean-Jaurès Toulouse – CNRS : UMR5602 – France

Lake sediment deposition provides a detailed archive of environmental change. Lake sediments trap various paleolimnology proxies, which can be examined to create a detailed illustration of human-climate-environment interactions over time. In mountainous areas, such erosion fluxes are expected to be essentially driven by rainfall and runoff (energy and climate drivers) and changes in land use and vegetation.

A simple empirical model, the De Ploey 'Es' equation, has been investigated in reconstruction of recent precipitation and erosion using lacustrine proxies. Lacustrine erosion has been quantified using red Amorphous Particle counts (rAP), mass deposition, rubidium (Rb) and titanium (Ti) content in mountain lakes sediment cores. Using these physical and proxy indicators of catchment erosion the relative precipitation influencing in this erosion has been calculated.

This analysis enables a quasi-quantified assessment of rainfall over the lacustrine archive period at decadal or smaller time steps. In conjunction with precipitation representation, this analysis presents an insight into the contributing catchment erosion susceptibility (Es). Erosion susceptibility can be an indicator of land use, vegetation cover and composition, ecosystem and climate change. In considering the fluctuations of erosion susceptibility the occurrence of major events such as extreme rainfall and flooding, major changes in land use and anthropic impact on the catchment can be identified. Within the TRAM project, analysis of mountain lakes sediment cores within the Vicdessos watershed (Pyrenees) illustrates rAP and the simple De Ploey 'Es' equation to be effective in recreating approximately decadal rainfall and erosion trends. The trend in erosion activity, susceptibility and rainfall occurrence illustrate increased variability and changing trends in the recent (Anthropocene) period.

**Mots-Clés:** lacustrine, erosion, sediment, paleoclimate, rainfall, empirical modelling, susceptibility

<sup>\*</sup>Intervenant

## La mer du Groenland : physiographie et fonctionnement sédimentaire au cours des derniers 500 000 ans.

Maude Biguenet <sup>\*ψ1</sup>, Marjolaine Sabine <sup>φ1</sup>, Guillaume Boisramé <sup>1</sup>, Sébastien Zaragozi <sup>§1</sup>, Frédérique Eynaud <sup>¶1</sup>, Jacques Giraudeau <sup>1</sup>, Elodie Marches <sup>2</sup>, Thierry Garlan <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de Bordeaux, UMR CNRS 5805 EPOC (EPOC) – Université de Bordeaux – France

<sup>2</sup> Shom - EPA Shom - 13 rue du Chatellier 29200 BREST, France

Dans le contexte du réchauffement climatique actuel, la dynamique de la calotte groenlandaise aux échelles orbitales, millénaires et sub-millénaires et son impact sur la variabilité de la sédimentation en domaine océanique profond restent très mal connues. Les archives sédimentaires issues des bassins bordants cette calotte sont susceptibles de livrer de précieuses données permettant de mieux contraindre cette dynamique.

Dans ce cadre, ce travail repose sur l'étude sédimentologique et stratigraphique de 3 carottes prélevées lors de la mission Shom - MOCOSED 2017 dans le bassin du Groenland (marge Est). Ces enregistrements sédimentaires prélevés entre 1800 et 3400 m de profondeur sont localisés au sein d'un système turbiditique directement alimenté par la marge est groenlandaise. Le double objectif de ce travail était (1) d'établir une première stratigraphie des dépôts enregistrés dans ce bassin sur la dizaine de mètres recouverte par les carottages et (2) de caractériser les processus sédimentaires affectant le bassin du Groenland.

Les carottes étudiées recouvrent plusieurs cycles climatiques (jusqu'à 500 000 ans d'enregistrement sédimentaire) et se composent essentiellement d'une alternance de dépôts turbiditiques et hémipelagiques. Notre étude multiproxy (sismique THR, morphobathymétrie, analyses des faciès sédimentaires par imagerie classique, RX et lames minces, analyses élémentaires par Fluorescence X-XRF, granulométrie, calcimétrie, analyses des fractions lithiques et biogéniques sableuses, biostratigraphie) a permis de mettre en évidence un lien entre l'avancée de la calotte groenlandaise sur le plateau continental lors des stades glaciaires et l'activité turbiditique dans le bassin pro-fond.

Etonnamment, les taux de sédimentation dans le bassin du Groenland sont très faibles (entre 0.9 et 4.6 cm/ka) et ce malgré une activité turbiditique soutenue. Ces faibles vitesses de sédimentation semblent liées à (1) une production carbonatée réduite, (2) une fonte encore limitée de la calotte groenlandaise, (3) une taille réduite des bassins versant terrestres et glaciaires alimentant le bassin et (4) la présence d'importants courants de fonds pouvant entraîner un vannage des particules fines.

**Mots-Clés:** Groenland, turbidites, chenaux, calotte, Quaternaire

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: maudebiguenet.mb@gmail.com

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: marjolaine.sabine@etu.u-bordeaux.fr

<sup>§</sup>Auteur correspondant: sebastien.zaragozi@u-bordeaux.fr

<sup>¶</sup>Auteur correspondant: f.eynaud@epoc.u-bordeaux1.fr

## Improve our understanding of Precambrian carbon positive isotopic excursions through the study of a new modern analogue: the Dziani Dzaha Lake

Pierre Cadeau <sup>\*1</sup>, Magali Ader <sup>1</sup>, Didier Jézéquel <sup>1</sup>, Gerard Sarazin <sup>1</sup>, Carine Chaduteau <sup>1</sup>, Cecile Bernard <sup>2</sup>, Hélène Agogue <sup>3</sup>, Eric Foulland <sup>4</sup>, Emilie Le Floc'h <sup>4</sup>, Christophe Leboulanger <sup>4</sup>

1 Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) – Université Paris Diderot - Paris 7, Université de la Réunion, CNRS UMR7154 – France

2 Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) – France

3 Université de La Rochelle (ULR) – Université de La Rochelle – France

4 MARine Biodiversity Exploitation and Conservation (UMR MARBEC) – Institut de Recherche pour le Développement : UMRD248, Ifremer : U M R9190, Université de Montpellier : U M R9190, CNRS, UMR9190 – Fr

Over Precambrian time, the evolution of  $\delta^{13}\text{C}$ carbonates in the sedimentary record is marked by positive isotope excursions, the most important in the Earth history being the Lomagundi-Jatuli event,  $\sim 2.3$  -  $2.1$  Ga. Generally, these isotopic excursions are interpreted as a major carbon cycle perturbations at a global scale, associated to an increase in organic carbon burial in sediments. However, the spatial and temporal variability of these excursions has led some authors to suggest that these events could be controlled by local/regional rather than global factors.

To acquire more understanding about the local/regional mechanisms that may be responsible for these excursions, we use here a modern analogue, the "Dziani Dzaha Lake", that shares a unique combination of analogies with Precambrian environments, among which water column anoxia except for a thin layer of surface water ranging from 0.5 to 2.2 meters which is oxic, low sulfate concentrations (from 0 to 3mM), and a prokaryotic dominated ecosystem. We performed a comprehensive carbon isotope study of the lake waters and sediments, which showed positive deviations of  $\sim +12\text{‰}$  in most carbon pools compared to the modern ocean. Combined with the determination of carbon fluxes, these results allow us to unambiguously demonstrate that methanogenesis and methane escape to the atmosphere are responsible for the positive isotopic deviation. In addition, we also show that only 4% of the raw primary productivity is buried in the lake sediments, which implies that in a prokaryotic dominated ecosystem and in spite of a complete lack of oxidant in bottom waters, organic matter is nonetheless efficiently mineralized, largely by methanogenesis.

By analogy, this provides an unprecedented insight into the Precambrian carbon cycle, demonstrating that some Precambrian ecosystems could have had the potential to drive the carbon isotope compositions towards positive values in environments where methane escape to the atmosphere was high enough.

**Mots-Clés:** Precambrian, Carbon, Excursion, Analogue, Dziani Dzaha

<sup>\*</sup>Intervenant

## Fluctuations du cycle hydrologique au cours du Pliensbachien (bassin de Cardigan Bay, Pays de Galles)

Jean-François Deconinck <sup>\*1</sup>, Stephen P. Hesselbo <sup>\*2</sup>, Pierre Pellenard <sup>\*2</sup>

<sup>1</sup> Université de Bourgogne – Biogéoscience – DIJON, France

<sup>2</sup> Camborne School of Mines University of Exeter – Royaume-Uni

L'évolution du climat au cours du Jurassique se caractérise par l'alternance de périodes froides et chaudes mises en évidence par de nombreuses études fondées sur les isotopes de l'oxygène mesurés sur les rostres de bélémnites ou les coquilles de mollusques. Ces changements climatiques s'accompagnent également de modifications du cycle hydrologique et des conditions d'altération sur les continents.

Afin de préciser les conditions d'érosion et d'altération durant le Pliensbachien, nous avons déterminé la composition de la fraction argileuse de 132 échantillons prélevés dans le forage de Mochras (bassin de Cardigan Bay, Pays de Galles). Les assemblages de minéraux argileux sont principalement constitués de chlorite, d'illite, d'interstratifiés irréguliers illite/smectite de type R1 (I/S R1), de smectite et de kaolinite avec des traces de berthierine. La présence de smectite indique que la température maximale liée à l'enfouissement n'a jamais dépassé 70°C, ce qui s'accorde avec les données sur la reflectance de la vitrinite et la présence de matière organique immature. Par conséquent, les minéraux argileux sont considérés comme détritiques et leurs fluctuations sont susceptibles de refléter les changements environnementaux.

Les variations dans les proportions de smectites et de kaolinite sont opposées. La kaolinite est particulièrement abondante à la base de la zone à Jamesoni et pendant la zone à Davoei tandis que la smectite est abondante 1) dans la partie supérieure de la zone à Jamesoni et à la base de la zone à Ibex et 2) au cours de la sous-zone subnodosus/gibbosus de la zone à Margaritatus. Les intervalles riches en kaolinite reflètent une intensification de l'hydrolyse et une accélération du cycle hydrologique, tandis que les intervalles riches en smectite indiquent un climat plus aride où la proportion de Classopollis est plus importante. La zone de Spinatum (Pliensbachien terminal) présente un assemblage argileux singulier dominé par les minéraux primaires et les I/S R1, et par de la kaolinite probablement remaniée de roches et sédiments anciens. La berthierine identifiée dans cet intervalle provient probablement de sédiments ferrifères (ironstones) déposés dans des environnements moins profonds. Ce changement minéralogique vers la fin du Pliensbachien reflète la transition d'une altération chimique dominante à une érosion physique plus profonde, qui pourrait être liée à une chute du niveau de la mer d'origine glacio-eustatique.

**Mots-Clés:** Pliensbachien, Minéraux argileux, Cardigan Bay Basin

<sup>\*</sup>Intervenant

## Argiles, Traceurs de Paléo environnement Sédimentaire (cas des bassins sédimentaires des Aurès –Algérie-)

Bachir Lamouri <sup>\*1</sup>, Fouad Djaiz <sup>2</sup>, Lakhdar Bouabsa <sup>1</sup>, Nathalie Fagel <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géodynamique et Ressources Naturelles (LGRN), Département de Géologie,, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie

<sup>2</sup> Université de Batna 2 Chahid Mostefa BENBOULAID de Batna, Algérie

<sup>3</sup> Argiles, Géochimie et Environnements Sédimentaires (UR AGEs), Département de Géologie B18, Sart- Tilman Allée du 6 Août, B-4000 Liège , Belgique

L'étude a pour but de retracer l'évolution des paléo environnements sédimentaires des bassins des Aurès dans l'Atlas saharien en Algérie, pour y répondre une campagne d'échantillonnage à l'affleurement a été effectuée à travers les formations argileuses comblant les centres de ces bassins. Les échantillons récoltés ont été préparés puis analysés par les différentes méthodes d'analyse classiques à savoir par diffraction des rayons X (XRD), Fluorescence X (XRF), Microscopie Électronique à Balayage (MEB) et par granulométrie laser. Les résultats obtenus ont révélé une diversité dans le cortège argileux contrôlée par des facteurs paléogéographiques propres à chaque bassin, ce qui a permis de répartir les échantillons en quatre groupes. Le premier se compose des formations de l'éocène moyen et sont représentées par des marnes avec seulement 35% de fraction argileuse, dominée équitablement par la smectite et la palygorskite accompagnées de traces d'illite. Ce qui donne référence à l'installation des conditions confinées qui ont précédé, la surrection atlasique favorisant principalement la formation de dépôts lagunaires. Le second représente les marnes d'âge miocène inférieur, constituées de 40% de fraction fine, elles se caractérisent par la prépondérance de la palygorskite liée à l'illite, kaolinite, smectite indiquant le retour de la mer dans l'Aurès suite à un affaissement du massif qui s'est produit surtout à sa périphérie, favorisant l'amorçement de la transgression burdigaliennes. Le troisième comporte les argiles d'âge miocène moyen. Elles sont constituées de plus de 50% de fraction fine à dominance de beidellite accompagnée essentiellement de la kaolinite, d'illite, et de chlorite ce qui confirme la généralisation de la transgression burdigaliennes déjà déclenchée au cours du Miocène inférieur . Le dernier groupe représente les argiles marno-gréseuses d'âge miocène supérieur dont la fraction fine est de l'ordre de 28 à 59%, caractérisée par une prépondérance de la palygorskite accompagnée d'illite, de chlorite, de smectite et de kaolinite. Ce qui synchronise avec de nouveaux mouvements épilogéniques verticaux qui se sont produits dans la partie, méridionale des Aurès provoquant ainsi le retrait progressive de la mer de l'intérieur du massif et l'installation d'une mer épicontinentale qui se traduit par l'apparition de faciès lagunaires puis continentaux

**Mots-Clés:** Aurès, paléo environnements, cortège argileux, transgression

\*Intervenant

## The mid-Cretaceous Proto-Atlantic during OAE2: modeling the effect of submarine topographical features on oceanic circulation and oxygen concentration

Marie Laugié <sup>\*ψ1,2</sup>, Jean-Baptiste Ladant <sup>1</sup>, Laurent Bopp <sup>3,4</sup>, Anne-Claire Chaboureau <sup>2</sup>,  
Yannick Donnadieu <sup>1</sup>, Jean-Noël Ferry <sup>2</sup>, Francois Raisson <sup>2</sup>

<sup>1</sup> CEREGE – CNRS : UMR7330, Institut de Recherche pour le Développement : UMR161, Aix Marseille Université UM34, Collège de France UMR 7330, INRA INSU, Fr

<sup>2</sup> Total EP – RD Frontier Exploration – France

<sup>3</sup> École normale supérieure - Paris – Département de Géosciences – France

<sup>4</sup> Laboratoire de Météorologie Dynamique (UMR 8539) (LMD) – Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, Ecole Polytechnique, Ecole des Ponts ParisTech, CNRS : UMR8539, École normale supérieure - Paris – France

Oceanic anoxic events (OAEs) are characterized by large marine deposition of organic-rich sediments, the black shales, the formation of which requires specific conditions such as sea floor anoxia. Mechanisms usually invoked as drivers of OAEs are various and still debated today. They include a control by the paleogeographical configuration, rise of the CO<sub>2</sub> atmospheric level, increased volcanic or hydrothermal activity, changes in oceanic circulation or enhanced marine productivity. In order to assess the role of these mechanisms and test the different scenarios, we use an IPCC-class model, the IPSL-CM5A2 Earth System Model, which couples the atmosphere, ocean, sea ice, marine and continental biosphere components. Its relatively fast computing speed allows multi thousand years simulations to be performed, which makes it suitable to model deep-time climates. We focus here on OAE2, which occurs during the Cretaceous at the Cenomanian-Turonian boundary (93,5 Ma), and is identified as a global event with evidence for seafloor anoxia in the Atlantic and Indian Oceans, the Southwest Tethys Sea and the Equatorial Pacific Ocean. In the Atlantic, black shales are well developed but present variations through space with heterogeneous nature, organic carbon content and distribution. The paleogeography of the mid-Cretaceous Proto-Atlantic seems to play a major role in these spatial variations, through its control on oceanic circulation. Possible key drivers of major ocean circulation changes indeed include the shallow and narrow equatorial seaway between the Northern enclosed basin and the Southern Atlantic, their shallow connection to the Pacific Ocean through the Panama gateway and the Drake Passage, the topographic features dividing the Southern Atlantic into several confined basins such as the Walvis and Rio Grande ridges. Several simulations using different water depths for these topographic highs are performed in order to test their control on oceanic circulation and oxygen concentration. Our different simulations are discussed by comparing the results to stratigraphic data across the Central to South Atlantic.

**Mots-Clés:** Paleoclimate modeling, OAE2, Cretaceous, Oceanic circulation, Atlantic, Black shales, Anoxia

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: laugie@cerege.fr

## Les sécheresses de la fin de la période Holocène en Afrique centrale

Anne-Marie Lezine <sup>\*1</sup>, Bruno Turcq <sup>1</sup>, Thierry Desjardins <sup>2</sup>, Yohann Tondu <sup>1</sup>, Magloire Mandeng-Yogo <sup>1</sup>, Jean-Pierre Nguetnkam <sup>3</sup>, Kévin Lemonnier <sup>1</sup>, F. Cetin <sup>1</sup>, Gaston Achoundong <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques (LOCEAN)  
- Museum National d'Histoire Naturelle, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6 : UM71, Institut national des sciences de l'Univers, CNRS : UMR7159, France

<sup>2</sup> Institut d'Ecologie et des sciences de l'environnement de Paris (IEES) - Institut National de la Recherche Agronomique : UMRA1392, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6 : UM113, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12, CNRS : UMR7618 - France

<sup>3</sup> Université de Ngaoundéré, faculté des sciences, département des sciences de la Terre, Cameroun

<sup>4</sup> 4 Herbier national du Cameroun, IRAD, Yaoundé - Cameroun

Dans le contexte actuel du changement global, comprendre comment un des plus grands réservoirs de carbone que représentent les forêts d'Afrique centrale, second massif forestier mondial, fait face aux variations du climat est un enjeu majeur. Longtemps pensé comme un écosystème résilient, les études paléoenvironnementales démontrent aujourd'hui qu'il a connu une succession de crises environnementales, accentuées au cours des derniers millénaires, par une pression anthropique accrue. Quelle est la part de la variabilité naturelle du climat et de l'activité humaine dans les crises qu'il a traversé depuis la fin de la période humide holocène ? C'est une question d'autant plus complexe que les études à haute résolution du passé sont extrêmement rares et mal réparties géographiquement, qu'il s'agisse de données paléoenvironnementales ou archéologiques. Un événement majeur a toutefois été mis en lumière : la grande fracturation forestière de la fin de la période holocène dont la chronologie se situe entre 4500 et 2500 avant le présent (Vincens et al., 1999). Les données palynologiques du Cameroun ont permis de préciser que cet événement avait tout d'abord touché les régions montagneuses de haute puis de moyenne altitude successivement à 3300 puis 3000 BP pour atteindre ensuite les basses altitudes à 2400 BP (Lézine et al., 2013) avec le développement général de plantes de lumière au sein de la forêt dense (ex : Ngomanda et al., 2009). Cette grande crise environnementale est-elle à l'origine de la mise en place des zones de savane du Cameroun ? A-t-elle été la seule crise des derniers millénaires ? Nous présentons ici la synthèse de reconstructions paléoenvironnementales issues de l'analyse palynologique et paléohydrologique de la série sédimentaire du lac Bambili ainsi que de données isotopiques ( $d_{13}C$ ) de la matière organique sur des profils de sols répartis dans les zones de savane actuelle. Ceci nous permet de préciser la chronologie des événements qui se sont succédés au cours des 4 derniers millénaires au Cameroun et de les mettre en regard des données archéologiques et anthracologiques issues de la littérature pour tenter d'identifier la part des événements naturels et de ceux liés à l'action de l'homme sur les paysages.

**Mots-Clés:** Afrique centrale, pollen, matière organique, sols, holocène

<sup>\*</sup>Intervenant

## Mécanismes à l'origine de l'expression sédimentaire des longs cycles de Milankovitch

Mathieu Martinez \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Rennes, OSUR – Université de Rennes I, CNRS : UMR6118 Géosciences Rennes, Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes – France

Les alternances marnes-calcaires offrent un enregistrement spectaculaire des cycles d'insolation causés par les mouvements de l'orbite terrestre. Ces alternances sont fréquemment groupées par faisceaux de 5 ou 20 alternances respectivement liées à l'excentricité de 100 ka et 405 ka. Du reste, les cycles d'excentricité concentrent l'essentiel de la variance des séries paléoclimatiques dans la bande de Milankovitch. Dans les séries d'insolation en revanche, la précession concentre l'essentiel de la variance. Je synthétise ici des résultats acquis dans le Domaine Subbétique (Espagne), dans les Monts Gerecse (Hongrie) et dans le Bassin Vocontien (France), trois bassins téthysiens enregistrant des alternances marnes-calcaires hémpélagiques au Crétacé inférieur. Dans ces trois bassins, les plus forts taux de sédimentation sont observés dans les marnes, ce qui suggère que les apports détritiques modulent le taux de sédimentation dans la bande de l'excentricité à 405 ka mais aussi à 2,4 Ma. Par ailleurs, dans le Domaine Subbétique, les proxies des apports détritiques montrent un cycle de 405 ka dominant la puissance spectrale des spectres, tandis que les proxies impliquant la production carbonatée montrent une atténuation de ce cycle de 405 ka. Dans les Monts Gerecse, la puissance spectrale de la susceptibilité magnétique et du gamma-ray est dominée par le cycle de 405 ka tandis que celle du  $d^{13}C_{bulk}$  est dominée par le cycle de 100 ka. Dans le Bassin Vocontien, des pics d'humidité se succèdent tous les 2,4 Ma et sont associés à des pics d'argilosité tandis que l'arrivée d'alternances plus carbonatées tend à supprimer l'enregistrement de l'excentricité. Les phénomènes dominés par les apports détritiques tendent donc à enregistrer les plus longues modulations de l'excentricité tandis que les alternances mixtes carbonates/argiles tendent à exprimer principalement le cycle de 100 ka. Les effets de mémoire liés aux processus de pédogénèse et d'érosion semblent être à l'origine de ce transfert de puissance depuis la précession vers les cycles d'excentricité de 405 ka et de 2,4 Ma. Par ailleurs, le changement de producteurs carbonatés en domaines de plates-formes et en domaines pélagiques modifie la réponse des carbonates au forçage orbital. En retour, cela entraîne une baisse de l'amplitude des longues modulations de l'excentricité, permettant ainsi au cycle de 100 ka de devenir le cycle dominant de certaines séries sédimentaires.

**Mots-Clés:** alternances marnes, calcaires, cycles de Milankovitch, excentricité, argiles, susceptibilité magnétique, gamma ray,  $d^{13}C$

\*Intervenant

## Réponses du d<sub>13</sub>C au forçage astronomique dans divers contextes de production carbonatée : le cas du Valanginien du Sud-Est de la France

Mathieu Martinez <sup>\*1</sup>, Landry Guillois <sup>1</sup>, Philippe Boulvais <sup>1</sup>, Jean-François Deconinck <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Rennes, OSUR – Université de Rennes I, CNRS : UMR6118 Géosciences Rennes, Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes, Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes – France

<sup>2</sup> UMR CNRS/UBFC 6282 Biogéosciences – Université de Bourgogne-Franche-Comté, CNRS : France

Le d<sub>13</sub>C est un outil fréquemment utilisé pour établir des échelles de temps astronomiques en milieu (hémi-) pélagique. Pourtant le lien entre d<sub>13</sub>C et forçage astronomique n'est pas toujours clair, tant les sources de carbone sont multiples. Nous avons comparé le d<sub>13</sub>C à la susceptibilité magnétique (SM) et aux cortèges argileux dans les séries marno-calcaires du Valanginien du Bassin Vocontien (SE France). Ces deux signaux sont fréquemment utilisés pour détecter un forçage astronomique dans les alternances marno-calcaires. Deux intervalles de 400 ka (correspondant à un cycle de grande excentricité) ont été ciblés, l'un avant la crise des producteurs carbonatés associée à l'événement Weissert, l'autre pendant cette crise. Dans les deux intervalles étudiés, les marnes sont enrichies en kaolinite et en illite tandis que les calcaires sont enrichis en smectite. Les bancs marneux se déposent donc sous un climat tropical humide tandis que les calcaires dans des conditions semi-arides. Pendant l'événement Weissert, l'excursion positive du d<sub>13</sub>C s'accompagne d'une augmentation des valeurs de SM et des teneurs en kaolinite et en illite. Les flux de nannofossiles les plus importants ont été observés dans cet intervalle, si bien que la hausse de d<sub>13</sub>C pourrait correspondre à une hausse de la productivité primaire pélagique dans un contexte climatique hydrolysant, marquées par d'importants apports détritiques et en nutriments. Avant l'événement Weissert, le d<sub>13</sub>C se corrèle toujours à la SM et aux teneurs en kaolinite et en illite, indiquant un contrôle des producteurs primaires pélagiques sur les valeurs de d<sub>13</sub>C. Dans la partie la plus carbonatée du cycle de 400 ka analysé, les valeurs de d<sub>13</sub>C sont plus élevées dans les calcaires que dans les marnes, tandis que cette relation s'inverse dans les parties les plus argileuses. Les bancs calcaires étant issus de l'export des plates-formes avoisinantes, nous suggérons que ces inversions de phase entre le d<sub>13</sub>C et la lithologie sont liés au changement du type de producteur carbonaté en domaine de plates-formes, modifiant ainsi la réponse du d<sub>13</sub>C au forçage astronomique. Les calibrations astronomiques réalisées en domaine (hémi-) pélagique à l'aide du d<sub>13</sub>C doivent donc être systématiquement couplées à d'autres proxys pour s'assurer de leur fiabilité.

**Mots-Clés:** isotopes du carbone, cycles de Milankovitch, argiles, susceptibilité magnétique, alternances marnes, calcaires, Crétacé

\*Intervenant

## Reconstitutions paléoenvironmentales et enregistrement paléoclimatique fini-carbonifère à permien du bassin d'Autun (Nord-Est du Massif Central)

Mathilde Mercuzot <sup>\*1</sup>, Sylvie Bourquin <sup>1</sup>, Pierre Pellenard <sup>2</sup>, Anne-Catherine Pierson-Wickmann <sup>1</sup>, Christophe Thomazo <sup>2</sup>, Laurent Beccaletto <sup>3</sup>, Céline Ducassou <sup>1</sup>, Johann Schnyder <sup>4</sup>, François Baudin <sup>4</sup>, Edouard Ravier <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Rennes (GR) - Université de Rennes 1 : UMR6118 - France

<sup>2</sup> Biogéosciences [Dijon] (BGS) - CNRS : UMR6282, Université de Bourgogne - France

<sup>3</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) - Bureau de Recherches Géologiques et Minières - France

<sup>4</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTEPI) - Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, CNRS : UMR7193 - Fr

<sup>5</sup> L.P.G - Le Mans - CNRS : UMR6112 - Avenue Olivier Messiaen 72085 Le Mans, France

Les bassins sédimentaires tardi-orogéniques fini-carbonifères à permiens du Nord-Est du Massif Central (bassins d'Autun, de l'Aumance, de Decize-La Machine et de Blanzy-Le Creusot) ont été principalement étudiés pour leur potentiel en ressources carbonées jusque dans les années 1980. Le regain d'intérêt qu'ils suscitent aujourd'hui s'appuie sur des aspects plus fondamentaux afin de mieux comprendre la période charnière qui est la fin du Paléozoïque. Les séries sédimentaires préservées dans ces bassins continentaux enregistrent en effet le démantèlement des reliefs hercyniens ainsi que l'évolution climatique (transition *icehouse-greenhouse*) se produisant entre la fin de l'accrétion de la Pangée et le début de sa dislocation, amorcée au Mésozoïque. Pour mener à bien les reconstitutions paléoenvironmentales et paléoclimatiques de cette période, une étude multidisciplinaire est proposée, couplant des approches sédimentologiques, pétrologiques, géochimiques, structurales et géochronologiques de ces différents bassins, dont le calage stratigraphique est mal contraint. Le bassin d'Autun, comprenant les séries stéphanienne et autuniennes du Carbonifère terminal au Permien inférieur, a fait l'objet d'une étude sédimentologique basée sur la description des carottes des forages d'Igornay (186 m) et de Chevrey (365 m), respectivement au Nord-Est et à l'Ouest du bassin et traversant la base de la série autunienne. Nos observations permettent de réviser le modèle sédimentologique fluviatile et fluvio-lacustre initialement proposé pour ces séries, en mettant en évidence des faciès essentiellement lacustres (argilites distales carbonées, varves, faciès turbiditiques et deltaïques, microbialites). Les analyses minéralogiques à haute résolution de l'assemblage argileux, complétées par la pyrolyse Rock-Eval et la géochimie isotopique et élémentaire du carbone et de l'azote organiques ont été réalisées sur le forage d'Igornay. Des fluctuations significatives au cours du temps du cycle hydrologique, de l'altération des bassins versants où le volcanisme est omniprésent et de la préservation de la matière organique sont mises en évidence. Ces fluctuations peuvent être reliées aux changements des paléoenvironments de dépôt (lac proximal vs. lac distal) du bassin ainsi qu'à des évolutions paléoclimatiques de plus grande échelle.

**Mots-Clés:** Carbonifère, Permien, paléoclimat, paléo-environnement, géochimie, carbone, azote, varisque, Massif Central

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>#</sup>Auteur correspondant: mathilde.mercuzot@univ-rennes1.fr

## Enregistrement du cycle du carbone au Pliensbachien (Jurassique inférieur) sur la marge sud téthysienne (Amellago, Haut-Atlas Central, Maroc)

Mathilde Mercuzot <sup>\*ψ1,2</sup>, Pierre Pellenard <sup>2</sup>, Christophe Durlet <sup>2</sup>, Cédric Bougeault <sup>2</sup>,  
 Christian Meister <sup>3</sup>, Jean-Louis Dommergues <sup>2</sup>, Nicolas Thibault <sup>4</sup>, Olivier Mathieu <sup>2</sup>, François Baudin <sup>5</sup>,  
 Khalid El Hmidi <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Rennes (GR) - Université de Rennes 1 : UMR6118 - France

<sup>2</sup> Biogéosciences [Dijon] (BGS) - CNRS : UMR6282, Université de Bourgogne - France

<sup>3</sup> Muséum Histoire Naturelle Genève - Département de Géologie et de Paléontologie, CH-1211 Genève 6, Suisse

<sup>4</sup> IGN Univerty of Copenhagen - Øster Voldgade 10, DK-1350, Copenhagen K Danemark

<sup>5</sup> Institut des sciences de la Terre de Paris (UMR 7193) - Université Pierre et Marie Curie Paris 6 - France

<sup>6</sup> Département de l'Energie et des Mines Direction de la Géologie - Haut Agdal, Rabat, Morocco, Maroc

Le Pliensbachien s'inscrit dans un contexte climatique *greenhouse* au Jurassique, en période de dislocation de la Pangée. De récentes études dans le domaine nord-ouest téthysien ont démontré une certaine variabilité climatique soutenue notamment par des variations isotopiques remarquables dans le cycle du carbone, comparables en amplitude et en durée à d'autres événements du Toarcien (e.g. T-OAE). Malgré la multiplication des travaux le long de la marge nord téthysienne avec la mise en évidence de changements géodynamiques importants, la marge sud n'a jamais été étudiée à haute résolution. Nous proposons, dans un cadre biostratigraphique extrêmement précis (ammonites et nannofossiles), une analyse chimiostratigraphique à haute résolution du  $\delta^{13}\text{C}$  des carbonates de la série hémipelagique pliensbachienne du Haut Atlas Central (Amellago, Maroc), complétée par une courbe à plus basse résolution du  $\delta^{13}\text{C}$  organique. Ces résultats sont confrontés aux données isotopiques inédites des bassins parisien ( $\delta^{13}\text{C}$  organique) et subalpin ( $\delta^{13}\text{C}$  carbonates), ainsi qu'à d'autres jeux de données de la marge nord téthysienne. Bien que des facteurs locaux influencent chaque bassin étudié, les fortes similarités entre les signaux isotopiques de part et d'autre du domaine nord-ouest téthysien et leurs calages temporels permettent de mettre en lumière un caractère synchrone des événements. Cinq événements suprarégionaux à globaux sont ainsi définis : (1) à la limite Sinémurien-Pliensbachien (SPBE,  $\approx \text{Ma}$ ) marquée par une excursion négative de  $-1,5\%$  à  $-3\%$  en réponse probable à un relargage de carbone léger ( $^{12}\text{C}$ ) par le volcanisme du CAMP et l'hydrothermalisme produit au niveau du corridor hispanique ; (2) dans la seconde moitié de la zone à Ibex, avec une excursion positive de  $+1$  à  $+1,5\%$  traduisant un stockage important de matière organique dans les sédiments, couplé localement à des apports carbonatés néritiques accrus en période régressive; (3) dans la zone à Davoei et au début de la zone à Margaritatus, avec une tendance négative du  $\delta^{13}\text{C}$  (carbonates et organique) en réponse à un changement courantologique remobilisant la matière organique sédimentaire; (4) dans les sous-zones à Subnodosus et Gibbosus (zone à Margaritatus) avec une excursion d'environ  $+2\%$  associée à un stockage important de matière organique ; (5) à la fin de la zone à Margaritatus et au début de la zone à Spinatum ( $-2\%$ ), période associée à des conditions plus froides pouvant avoir favorisé le développement de glace aux pôles.

**Mots-Clés:** chimiostratigraphie, Jurassique, Pliensbachien, paléoclimats, paléoenvironnements, carbone, Maroc

## A sea-level fingerprint of the Late Ordovician ice-sheet collapse

Alexandre Pohl <sup>\*1</sup>, Jacqueline Austermann <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement (CEREGE) – Aix Marseille Université, CNRS : UMR7330, IRD, Collège de France – Europole de l'Arbois BP 80 13545 Aix-en-Provence, France

<sup>2</sup> Lamont Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, New York 10964, USA (Lamont) – États-Unis

The Hirnantian glacial acme (445–444 Ma) represents the glacial maximum of the long-lived Ordovician glaciation. The ensuing deglaciation and associated transgression deeply affected depositional environments and critically impacted marine living communities, contributing to the Late Ordovician Mass Extinction. In the absence of a better model, this transgressive event is usually considered to be a uniform (i.e., eustatic) rise in sea level, at least at low to intermediate paleolatitudes. This assumption may lead to erroneous interpretations of the geological record. Here we use a land-ice model and a gravitationally self-consistent treatment of sea-level change to propose the first numerical simulation of spatially varying late Hirnantian sea-level rise. We demonstrate significant departures from eustasy and compare our modeling results to key sedimentary sections. We show that previously enigmatic opposite sea-level trends (i.e., transgressive versus regressive) documented in the geological record are predicted by the model. Such sections may thus reflect patterns of sea-level change more complex than the eustatic approximation considered so far, rather than erroneous correlations. Our simulations also predict the locations where values of relative sea-level change are closest to the values predicted by a globally uniform rise and hence most representative of the volume of the ice sheet that collapsed. We identify these regions as preferential loci for future fieldwork investigating the ice volume during the Hirnantian glacial peak.

**Mots-Clés:** ordovician, deglaciation, sea level, glacial isostatic adjustment

<sup>\*</sup>Intervenant

## Evolution des marqueurs géochimiques au cours de l'OAE 2 dans le site DSDP 367 (Cap Vert) et dynamique de l'anoxie dans le Proto-Atlantique

Laurent Riquier <sup>\*1</sup>, Pierre Cadeau <sup>2</sup>, Christophe Thomazo <sup>3</sup>, Julien Danzelle <sup>1</sup>, François Baudin <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTeP) – Université Pierre et Marie Curie - Paris 6 : UMR7193, CNRS : UMR7193 – France

<sup>2</sup> IFP Energies nouvelles (IFPEN) – IFP Energies Nouvelles, IFP Energies Nouvelles – France

<sup>3</sup> Biogéosciences [Dijon] – Université de Bourgogne : UMR6282, CNRS : UMR6282 – France

La limite Cénomanien-Turonien (C-T ; 93,9 Ma) est marquée par la mise en place de niveaux sombres et laminés, observés dans de nombreux environnements marins allant de la plate-forme aux bassins profonds. Le dépôt de ces niveaux sombres se caractérise dans de nombreuses régions du globe par un enrichissement important en Total Organic Carbon (TOC) ainsi qu'une excursion positive du signal de d13C des carbonates et de la matière organique. Ceci est particulièrement bien observé dans la série sédimentaire du site DSDP 367, situé au large du Cap Vert. Ce site, foré en 1975 et interprété comme correspondant à un environnement de plaine abyssale, présente une séquence d'environ 7 m de niveaux sombres marquée par une hausse des valeurs en TOC, jusqu'à atteindre 50% vers le milieu de cette séquence et d'une excursion du d13Corg d'environ + 5.6 %. Un tel enrichissement en TOC dans les sédiments nécessite des conditions paléo-environnementales bien particulières que nous avons reconstituées à l'aide d'une approche géochimique multi-marqueurs, principalement basée sur les éléments traces métalliques. Les fortes concentrations d'éléments, tels que Mo, U et V, associé à la hausse des valeurs de TOC, observée jusqu'à environ 3 m indiquent clairement la mise en place de conditions anoxiques à euxiniques à la base de cette séquence. Ceci est également confirmé par les fortes valeurs de rapports tels que U/Th, V/Cr. Cet appauvrissement en O2 n'est cependant pas continu sur toute la séquence. Vers 3 m, une baisse importante des concentrations en Mo, U, et V est observée sur un court intervalle, suggérant un ré-oxygénéation rapide de la colonne d'eau. Cet intervalle correspond à l'Événement froid Plenus, qui est associé à un apport important d'eaux froides venant du Pôle Nord. Cet événement, initialement observée en France (Pont d'Issole) et en Angleterre (Eastbourne), est également enregistré dans plusieurs sites de l'Océan Atlantique. Suite à cet épisode de ré-oxygénéation, les concentrations en Mo, U, V présentent une hausse de leurs valeurs sans pour autant atteindre celles observées avant l'événement Plenus. Les éléments marqueurs de paléo-productivité, tels que Ba et Ni, présentent des variations moins contrastées et semblent peu affectés par l'événement Plenus. Leurs concentrations augmentent progressivement et les valeurs les plus élevées sont observées après cet événement, suggérant une influence croissante de la productivité primaire au cours de l'OAE2 pour ce site.

**Mots-Clés:** Crétacé, OAE2, euxinie, Événement Plenus, réoxygénéation, productivité

\*Intervenant

## Thermochronological evidence for limited Cenozoic and major Late Carboniferous glacier erosion - exhumation in East Antarctica

Yann Rolland <sup>\*1,2</sup>, Matthias Bernet <sup>3</sup>, Peter Van Der Beek <sup>3</sup>, Cécile Gautheron <sup>4</sup>, Guillaume Duclaux <sup>5</sup>, Jérôme Bascou <sup>6</sup>, Christian Sue <sup>7,8</sup>, René-Pierre Ménot <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Géoazur (GEOAZUR) – Université Nice Sophia Antipolis (UNS), INSU, Observatoire de la Côte 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

<sup>2</sup> EDYTEM – Université de Savoie – France

<sup>3</sup> ISTerre (UGA) – CNRS and University Grenoble Alpes – France

<sup>4</sup> Géosciences Paris Sud (GEOPS) – Université Paris-Sud - Paris 11, CNRS : UMR8148 – France

<sup>5</sup> Geoazur – Université Côte d’Azur, CNRS, IRD, Observatoire de la Côte d’Azur, Géoazur – France

<sup>6</sup> Université Jean Monnet, Saint-Etienne – PRES Université de Lyon, CNRS : UMR6524, Laboratoire Magmas et Volcans – 23 rue du docteur P.Michelon 42001 Saint-Etienne Cedex 1, France

<sup>7</sup> OSU THETA – INSU – Besançon, France

<sup>8</sup> UMR 6249 - Laboratoire Chrono-environnement (UMR 6249 - Laboratoire Chrono-environnement) – Université de Franche-Comté – Besançon, France

Thermochronology of the Terre Adélie basement from an along-coast transect in East Antarctica highlights a homogeneous exhumation history, mainly achieved before 290 Ma. The data shows no detectable (< 2km) Cenozoic glacier erosion by either apatite fission-track (AFT) nor apatite (U-Th)/He (AHe) methods, even in zones of major glaciers (e.g., Mertz Glacier). In contrast, the thermochronological dataset agrees for a major phase of erosion at 340-300 Ma. At this time, the East Antarctica Craton was already positioned close the South Pole in the interiors of the Pangea mega-continent in a zone devoid of any significant tectonic deformation. Based on the position of peripheral Carboniferous sedimentary basins and paleo-glacier flux directions, we speculate that homogeneous and sustained glacier-driven exhumation of a crustal section  $\geq$  4 km on a  $\geq$  2-4 Mkm<sup>2</sup> portion of East Antarctica, leads to erosion estimates of the order of 0.8-1.6 10<sup>7</sup> km<sup>3</sup> comparable to the Cenozoic erosion of the Himalaya-Tibet orogeny. This process explains why the Mawson Craton exposes middle-lower crustal rocks and is devoid of any sedimentary cover. This efficient glacier erosion on a large-scale below a polar ice sheet extending roughly where the current East Antarctic ice cap stands might thus account for a large part of the drop of atmospheric CO<sub>2</sub> contents and climate change at a global scale during the late Paleozoic ice age.

**Mots-Clés:** Antarctica, erosion, thermochronology, glaciers, LPIA

\*Intervenant

## Géomorphologie, stratigraphie et reconstructions paléoenvironnementales au Pléistocène moyen – supérieur dans le détroit de Fram

Marjolaine Sabine <sup>\*1</sup>, Sébastien Zaragozi <sup>\*1</sup>, Eynaud Frédérique <sup>1</sup>, Elodie Marches <sup>2</sup>, Jimmy Daynac<sup>1</sup>, Alexie Cogné <sup>1</sup>, Linda Rossignol <sup>1</sup>, Thierry Garlan <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Bordeaux, UMR CNRS 5805 EPOC (EPOC) – Université de Bordeaux (Bordeaux, France) - France

<sup>2</sup> Shom (Shom) - EPA Shom - 13 rue du Chatellier 29200 BREST, France

<sup>3</sup> Shom (Shom) - EPA Shom - France

Le détroit de Fram est la seule connexion directe actuelle entre les eaux chaudes et salées de l'Atlantique Nord et les eaux froides et plus douces de l'Arctique. Le courant atlantique remonte par l'est, le long de la marge ouest de l'archipel du Svalbard et entre en Arctique le long du plateau de Yermack, entraînant le dépôt de corps contouritiques sur le fond du détroit (Howe et al., 2007). Les sédiments qui se déposent enregistrent à la fois les changements de circulation océanique (dont la circulation thermohaline), mais aussi les variations du couvert de glace de mer et d'apports terrigènes des calottes glaciaires (Howe et al., 2007; Müller and Stein, 2014). Les données des carottes sédimentaires issues de ce détroit remontent rarement au-delà du dernier glaciation (environ 30 ka cal BP) ou la dernière déglaciation (Howe et al., 2007; Müller and Stein, 2014; Stein and Fahl, 2013; Zamelczyk et al., 2012). De plus, les conditions environnementales très particulières et difficiles de cette zone compliquent la préservation des microfossiles et donc l'élaboration d'échelles stratigraphiques précises.

Pour cette étude, quatre carottes sédimentaires profondes issues de la mission SHOM MOCOSED 2017 (n.o. Pourquoi Pas ?) sont analysées. Elles sont idéalement situées au cœur du détroit de Fram et permettent d'améliorer le travail stratigraphique déjà réalisé sur la base des sites ODP 911A et 912A (Grøsfeld et al., 2014; Stein and Fahl, 2013). La période de temps couverte par ces carottes remonte à plus de 400 ka BP. Elles permettent également de mieux caractériser l'évolution des processus sédimentaires en jeu dans le détroit selon l'alternance des périodes glaciaires et interglaciaires ; mais aussi les changements dans les échanges de masses d'eau entre l'océan Arctique et les mers nordiques.

Ce travail présente la compilation des données d'analyses sédimentaires (X-Ray Fluorescence (XRF), imagerie aux rayons X (SCOPIX), comptages de foraminifères et IRD, mesures microgranulométriques laser, analyse de lames minces, identification de zones d'acmé de cocolithophores de 35,5 m de sédiment, ainsi que le traitement des données bathymétriques multifaisceaux et des données sismiques THR (CHIRP). La variation de l'intensité des glaciations, du couvert de glace de mer, du niveau marin et du rejet isostasique sont autant de paramètres qui ont influencés l'intensité des échanges entre l'Arctique et les mers nordiques, et donc de la circulation océanique globale.

Grøsfeld, K., et al., 2014. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.08.028> Howe, J.A., et al 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2007.00897.x> Müller, J., Stein, R., 2014. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.07.016>

Stein, R., Fahl, K., 2013. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2012.11.005> Zamelczyk, et al 2012. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2012.07.006>

**Mots-Clés:** contourites, turbidites, glace de mer, détroit de Fram, périodes glaciaires/interglaciaires, Pléistocène

## Euxinic to anoxic sea-water conditions during the Petit Granit deposition in the Soignies basin (upper Tournaisian, Belgium)

Francisco Serbeto Ibanez <sup>\*1</sup>, Xavier Devleeschouwer <sup>1/2</sup>

<sup>1</sup> Université Libre de Bruxelles [Bruxelles] (ULB) – Belgique

<sup>2</sup> Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique (IRSNB) – Belgique

Many active quarries in Wallonia (Belgium) are exploiting the famous Tournaisian rocks colloquially called the "Pierre Bleue" or "Petit Granit". This rock corresponds to massive crinoidal limestones with a natural dark blue to dark grey colour. These limestones contain essentially disarticulated crinoid fragments with minor presence of brachiopods, solitary rugose corals, trilobites, bryozoans and sometimes sponges. The carbonate content ranges between 93-98 %.

An extensive work was started last year in one quarry (Tellier des Prés, Soignies, Belgium) to establish the sedimentary environment and the diagenetic sequence of the "Petit Granit" rocks. The studied 20-meters limestone sequence belongs (from top to bottom) to the lower part of the Thiarmont Member (Malon-Fontaine Formation) and the upper part of the Soignies Member or "Petit Granit" (Ecaussines Formation). Both formations are Ivorian or upper Tournaisian (Carboniferous) in age.

Gamma-ray spectrometry measurements (GRS) were taken at the outcrop with a handheld GRS device every 25 cm along the studied sequence. Each 2-minute measurement records the K (%), Th (ppm), U (ppm) and Dose Rate (nGy/h) concentrations. Three successive measurements on each point were taken and averaged. The data shows weak K concentrations ranging between less than 0.3 to rarely above 0.9 % and weak Th concentrations ranging between 0.3 and 1.3 ppm. U concentrations are generally well above 3 ppm with several peaks of more than 7 ppm. The U/Th ratios are mostly stable in between 3 and 13 and two peaks above 30 are observed in the sequence. The high U/Th values (above 3) suggest anoxic conditions of the sea water at the time of the deposition. The very low concentrations in K and Th indicate very weak detrital fluxes in the sequence.

Scanning Electron Microscope (SEM) observations, on one sample per meter, revealed abundant frambooidal pyrite disseminated in the matrix and concentrated in the stylolithes. For each sample, the apparent frambooid diameter was measured on a significant frambooid population for statistical analyses. The box and whisker plot shows that the mean diameter of the frambooids are generally below 6 µm ranging between 3 and 9 µm at the base of the sequence. There is a slight trend towards higher mean diameters at the top of the sequence with a mean diameter above 6 µm ranging between 4 and 18 µm. The mean versus the standard deviation plot reveals euxinic conditions at the base of the sequence changing upwards to anoxic and dysoxic conditions. The mean versus the skewness plot indicate anoxic conditions at the base of the sequence (upper part of the Soignies Member) and more dysoxic conditions at the top of the sequence. Euxinic-anoxic conditions during this stratigraphic time interval suggest an expansion of anoxic conditions from deeper areas into shallower ramp environments.

**Mots-Clés:** Petit Granit, euxinic, anoxia, frambooid, pyrite, gamma, ray spectrometry

\*Auteur correspondant: Francisco.Serbeto.Ibanez@ulb.ac.be

## How to interpret the offset between marls and limestones of carbon isotopes on the bulk rocks in Zumaia GSSP (Spain)?

Sébastien Wouters <sup>\*1</sup>, Etienne Steurbaut <sup>2</sup>, Jean-Yves Storme <sup>3</sup>, Johan Yans <sup>3</sup>, Xavier Devleeschouwer <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de Liège, Laboratoire de Pétrologie Sédimentaire (PETROSED) – Belgique

<sup>2</sup> Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique (IRSNB) – Belgique

<sup>3</sup> Université de Namur - Département de Géologie (UNamur) – Belgique

The Zumaia section in Spain is the Global Stratotype Section and Point (GSSP) for the Selandian and Thanetian (Schmitz et al. 2011). It has been much studied for bulk rock stable carbon isotopes in the Danian-Selandian transition interval (Schmitz et al. 1997; Dinarès-Turell et al. 2012; Dinarès-Turell et al. 2014; Storme et al. 2014).

New carbon isotopes measurements on marls and limestones show a consistent offset of values between the two lithologies. Correlation was found between C isotopes and carbonate content ( $r = 0.47$ ), and C and O isotopes ( $r = 0.67$ ) in marly samples, implying a stronger lithological effect in marls. This is important to interpret Schmitz et al. (1997) curves as in parts of the section where limestones were unavailable they used marly material. A lithological effect may thus partly explain the two excursions observed in that interval by Schmitz et al. in 1997: CIE-DS1 and CIE-DS2 (Arenillas et al. 2008).

The lithological effect has been confirmed by Dinarès-Turell et al. (2012) as they resampled the section in search of the Latest Danian Event (LDE), a negative carbon isotopic excursion (Bornemann et al. 2009). They showed a link between carbonate content and carbon isotopes values. But they also found a negative excursion in limestone samples only, equivalent to CIE- DS1 and attributed to the LDE.

The scarcity of limestone beds in the lower part of the Selandian where CIE-DS2 is observed prevents to work on limestone samples only.

Two explanations can be given to explain the lithological effect on bulk-rock carbon isotopes:

- This effect is primary, and the environmental processes controlling marl-limestone alternations (see Dinares-Turell et al., 2012) also influence the carbon isotopic signal.

- This effect is due to diagenesis, which would affect limestones and marls differently.

If diagenesis is at the source of the lithological effect, the primary signal is still found in limestones. In marls the diagenetic overprint could leave part of the primary signal, but this remains to be confirmed by future work.

Arenillas et al. 2008. *Terra Nova* 20 (1): 38-44.

Bornemann et al. 2009. *J. Geol. Soc. London* 166: 1135-1142.

Dinarès-Turell et al. 2012. *Terra Nova* 24 (6): 477-486.

Dinarès-Turell et al. 2014. *Earth Planet. Sci. Lett.* 405: 119-131.

Schmitz, et al. 1997. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 133 : 49-68.

Schmitz et al. 2011. *Episodes* 34 (4): 220-243.

Storme et al. 2014. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 414: 212-224.

**Mots-Clés:** Zumaia, Bulk, rock C isotopes, Diagenesis, Marls, Limestones

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>†</sup>Auteur correspondant: sebastien.wouters@doct.uliege.be



## **7.2. Traçage des transferts terrigènes actuels et passés – implications paléoclimatiques // Les méthodes magnétiques à la rescousse de la géodynamique et des paléoenvironnements**

## Utilisation de traceurs géochimiques pour étudier la dynamique sédimentaire et l'impact anthropique de dépôts de dragage à proximité d'une zone côtière : exemple en baie de Seine Orientale

Noémie Baux <sup>\*ψ1</sup>, Anne Murat <sup>1,2</sup>, Quentin Faivre <sup>1,2</sup>, Emmanuel Poizot <sup>2,1</sup>, Yann Méar <sup>1,2</sup>, Sébastien Brasselet <sup>2</sup>, Sandric Lesourd <sup>1</sup>, Jean-Claude Dauvin <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Normandie Univ, UNICAEN, UNIROUEN, CNRS, Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C), UMR CNRS 6143, 14000 Caen, France – Université de Caen Normandie : UMR6143 – France

<sup>2</sup> Conservatoire National des Arts et Métiers, INTECHMER, 50100 Cherbourg, France – CNAM-INTECHMER – Fr

<sup>3</sup> Grand Port Maritime du Havre (GPMH) – GPMH – 1 quai de new York 76067 LE HAVRE Cedex, France

Dans les études sédimentaires côtières, l'équilibre dynamique est défini, comme un équilibre entre le transport des particules, l'érosion et le dépôt, en fonction des processus physico-chimiques et hydrodynamiques associés, dont la marée et la houle. En baie de Seine et dans l'estuaire, les processus de dépôt et d'érosion des particules fines sont principalement étudiés sur la base d'études sédimentologiques, de calculs de taux de sédimentation, de modélisation et/ou de leur association avec la macrofaune benthique. Dans le présent travail, une autre approche est envisagée, sur la base de traceurs géochimiques, pour comprendre les mécanismes sédimentaires présents entre le cap de La Hève et celui d'Antifer (baie de Seine Orientale). L'étude a été menée sur des prélèvements sédimentaires réalisés début 2016 à l'aide d'une benne Shipeck. Un échantillonnage de 179 stations, disposées en lignes parallèles à la côte (espacées de 500 m), a été mené entre le cap de La Hève et le port d'Antifer, zone incluant le site de dépôt de dragage du Grand Port Maritime du Havre (Octeville). Pour caractériser les sources, des prélèvements ont été effectués dans les bassins portuaires fortement et faiblement dragués (13 stations) ainsi que dans l'estuaire de la Seine, en eau saumâtre et en eau douce (trois stations). La composition géochimique a été obtenue par XRF (X-ray fluorescence, Spectro xSORT) et par analyseur carbone/soufre (LECO CS 744), pour le dosage du carbone organique total (COT). La sélection des éléments porteurs d'information a été menée progressivement par la réalisation de plusieurs Analyses en Composantes Principales (ACP). Ces dernières ont permis de sélectionner sept éléments (Si, As, S, Pb, Rb, Br organique et COT). L'étude des traceurs géochimiques révèle l'existence d'une zone à l'équilibre dynamique. Cette zone présente deux gradients de COT perpendiculaires à la côte et convergents vers la limite d'action dominante houle-marée, située au niveau de la courbe bathymétrique des 15 m. La rupture de ces gradients met en évidence une zone perturbée à proximité du site de dépôt de dragage. Les sédiments portuaires sont plus fins et enrichis en S, Pb et COT, en lien avec l'environnement calme des bassins, qui conditionne les processus diagénétiques. Cette composition géochimique différente permet d'identifier *in situ* les sédiments portuaires après leur dépôt et d'étudier le mouvement des particules fines clapées à l'échelle de toute la partie nord-orientale de la baie de Seine.

**Mots-Clés:** traceurs géochimiques, dynamique sédimentaire, limite d'action houle/marée, sources anthropiques et naturelles, impact du dragage.

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: noemie.baux@unicaen.fr



## Etude du sillon Benoud (Algérie) par les méthodes géophysiques

Amar Bourmatte <sup>\*ψ1</sup>

<sup>1</sup> 1 Laboratoire de géophysique- Faculté des sciences de la terre, de géographie et aménagement du territoire, Alger, Algérie (FSTGAT; USTHB) – Algérie

Le sillon Benoud constitue la partie ouest de la flexure sud atlasique qui est la zone de suture entre la plateforme saharienne relativement peu déformée au sud et le domaine atlasique fortement plissé au nord. Il s'agit d'un bassin d'avant-pays orienté NE-SO à remplissage essentiellement cénozoïque.

La plateforme saharienne a été structurée au paléozoïque et est demeurée stable depuis. Le domaine atlasique a été intensément déformé par les phases tectoniques éocène et post-éocène. Cette limite est interprétée en un front de chevauchement. L'évolution géodynamique dans cette partie de l'Atlas est très complexe. Les structures tectoniques héritées de l'hercynien conditionnent la mise en place des chevauchements alpins (mesocénozoïque) sur la bordure sud du domaine. Les études régionales font de l'accident sud atlasique, notamment les segments algériens et marocains, l'expression frontale d'un chevauchement à vergence sud, qui charrierait l'ensemble du domaine atlasique sur la plate-forme saharienne.

On utilise, dans cette étude, les données de l'anomalie de Bouguer et de l'anomalie du champ magnétique pour contraindre la géométrie des structures géologiques.

Différents traitements numériques sont utilisés : les gradients vertical et horizontal qui permettent la séparation des anomalies créées par les structures ; les prolongements vers le haut à plusieurs hauteurs afin de cerner les limites des structures à différentes profondeurs d'investigation ; la méthode du tilt angle pour mettre en évidence les limites des structures et donner une idée sur leurs profondeurs ; la méthode d'analyse spectrale qui donne une indication sur les variations des profondeurs des structures géologiques en relation avec les fréquences spatiales du signal géophysique.

Les résultats de ces investigations seront présentés sous forme d'une carte structurale interprétative.

**Mots-Clés:** sillon Benoud (Algérie), flexure sud atlasique, l'anomalie de Bouguer, champ magnétique, traitements numériques

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: abourmatte@gmail.com

## Le scanner magnétique haute résolution : un nouvel outil en sédimentologie ?

François Demory <sup>\*1</sup>, Yoann Quesnel <sup>1</sup>, Minoru Uehara <sup>1</sup>, Kazuyo Tachikawa <sup>1</sup>, Marta Garcia <sup>1</sup>,  
Carole Romey <sup>1</sup>, Pierre Rochette <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE) - Aix Marseille Université, CNRS : UMR7330, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UMR161, Institut national de la recherche agronomique (INRA) : US1410, Collège de France, Collège de France - France

Le scanner magnétique haute résolution spatiale développé au laboratoire de magnétisme des roches du CEREGE fournit un enregistrement sur échantillon continu de sédiment (U channel ou carotte) des propriétés magnétiques avec un pas de mesure de 500 micromètres et une définition infra-centimétrique en quelques dizaines de seconde par mètre. Forts de cet instrument, nous avons couplé les mesures magnétiques aux données issues de la description faciologique macroscopique et aux données de XRF en vue d'une modélisation du signal magnétique. Dans ce cadre la définition d'un prisme sédimentaire en tant qu'entité propre est questionnée tant d'un point de vue magnétique que chimique : en effet, les processus d'oxydo-réduction impliquent souvent une mobilité du fer dans la porosité. Ce phénomène sera observé dans les données XRF alors que dans le cas de la description faciologique macroscopique, ce phénomène peut être invisible. En dernier recours, l'enregistrement magnétique qui est à la fois influencé par les facies sédimentologiques et diagénétiques peut permettre, à l'aide de la modélisation du signal, de distinguer les deux processus superposés.

**Mots-Clés:** Magnétométrie, haute résolution, sédimentologie

Intervenant

## Des marqueurs élémentaires, outils de traçage de la source au dépôt : application au gradient terre-mer dans un bassin estuaire semi-fermé (rade de Brest)

Gwendoline Grégoire <sup>\*1,2</sup>, Anne Murat <sup>1,2</sup>, Axel Ehrhold <sup>3</sup>, Gwenael Jouet <sup>3</sup>, Pascal Le Roy <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences et Techniques de la Mer (INTECHMER) – Conservatoire National des Arts et Métiers [CNAM] – France

<sup>2</sup> Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg (LUSAC) – Université de Caen Normandie : EA4253 – France

<sup>3</sup> Laboratoire Géodynamique et enregistrement Sédimentaire - Geosciences Marines (GM-LGS) - Institut français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer – France

<sup>4</sup> Laboratoire Géosciences Océan (LGO) – Université de Brest – France

Les variations hydrodynamiques, eustatiques et climatiques peuvent être mises en évidence par le biais de traceurs de géochimie sédimentaire. La rade de Brest est sous l'influence combinée des sources marines et continentales et connaît un essor important de son activité anthropique depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle. Pour arriver à identifier les sources dans ce bassin, des analyses élémentaires ont été effectuées sur des échantillons de surface. Dans notre contexte, les apports marins actuels sont concentrés dans les fractions grossières, essentiellement carbonatées, et les apports détritiques dans les fractions fines. Pour s'abstraire de la granulométrie, nous avons travaillé pour chacune des sources sur des éléments chimiques appartenant à la même matrice : Calcium et Strontium pour les carbonates ainsi que Titane et Rubidium pour les fractions fines et détritiques. Le calcium et le strontium quantifient les carbonates, ils sont très corrélés l'un à l'autre. Leur cartographie permet de mettre en évidence un gradient Terre-Mer localement perturbé par l'existence de deux origines de carbonates marins (maërl et coquilles différenciés par leur rapport Ca/Sr). Le rubidium et le titane quantifient la fraction détritique fine. Ces deux éléments sont corrélés l'un à l'autre mais leur origine minéralogique est différente. Le rubidium marque les phyllosilicates de type illite-muscovite ; le titane provient du rutile. Ces minéraux sont présents sur le bassin versant mais le rutile est plus concentré dans les affleurements carbonifères érodés par l'Aulne. Le rapport Ti/Rb permet de tracer à partir des différents fleuves, le devenir des particules fines et ainsi, de mettre en évidence l'influence prédominante de l'Aulne sur le bassin. Parmi les impacts anthropiques qui peuvent-être tracés en rade de Brest, l'activité minière se distingue par d'importants apports en plomb. Les mines "sources" sont connues depuis l'antiquité et ont été particulièrement exploitées au cours du XIX<sup>e</sup> siècle. Les plus fortes concentrations, de l'ordre du pourcent, ont été rencontrées juste à l'aval de la mine de Huelgoat, puis décroissent ensuite vers l'estuaire de l'Aulne. Dans la rade, ce gradient se poursuit vers l'ouest jusqu'au goulet mais des variabilités de concentration apparaissent de part la présence plus ou moins forte de sulfures dans le sédiment de surface.

**Mots-Clés:** Traceurs géochimiques, gradient terre, mer, sources terrigènes, marines et anthropiques

Intervenant

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: gwendoline.gregoire@lecnam.net

## Large basement tilts in the Pyrenean retro-foreland revealed by paleomagnetic data

Esther Izquierdo Llavall <sup>\*1</sup>, Charles Aubourg <sup>\*1</sup>, Jean-Paul Callot <sup>1</sup>, Pierre Camps <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs (LFC-R) – Université de Pau et des Pays de l'Adour,  
TOTAL, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5150 – France

<sup>2</sup> Géosciences Montpellier – Université de Montpellier : UMR5243 – France

In slates, pyrrhotite develops at the expense of magnetite and pyrite at temperature close to 350°C, which is about 30°C above the Curie temperature of pyrrhotite. It results that any remanence carried by pyrrhotite is a thermo-remanent remagnetization (TRM) acquired during the cooling of metamorphic units, across the 320°C isotherm. This remagnetization has the potential to record any rotation during the exhumation of metamorphic rocks. This characteristic was applied successfully in the Himalaya where modest basement tilts (< 20°) have been recorded. Here, we show that remagnetization in Albian slates from the retro-foreland of Pyrenees displays a huge deviation with respect to the Cenozoic earth magnetic field. Rock magnetism demonstrates that pyrrhotite (Fe7S8) is the main magnetic carrier of Albian slates, which is consistent with peak burial temperatures > 350°C. The ChRM is well defined and the fold test revealed its post-folding acquisition. However, ChRM are at large variance from the reference magnetic field. We have tested laboratory-induced TRM to check about possible bias in the paleomagnetic record. This laboratory-induced TRM is parallel to the applied field within few degrees. Hence, it appears that this Albian remagnetization revealed a post folding movement that we attribute to basement tilts up to 70°. Tilt values draw a broad pattern with small tilt to the North of the Chainons Béarnais, strong northward tilt in the center and south of the Chainons Béarnais, and weak southward tilt along the northern Axial Zone. These tilts are consistent with recent models of the pyrenean orogeny including hyperextension and early folding (gravity-driven and salt-driven), followed by convergence with basement thrusting accounting for the passive transport of previously folded Mesozoic units.

**Mots-Clés:** Paléomagnétisme

<sup>\*</sup>Intervenant

## L'apport des méthodes potentielles magnétiques pour caractériser la paléo-latitude de mise en place d'un dyke

Pauline Le Maire <sup>\*1,2</sup>, Munsch Marc <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Cardem - France

<sup>2</sup> Institut de physique du globe de Strasbourg (IPGS) - université de Strasbourg, Institut national des sciences de l'Univers, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7516 - France

En méthode potentielle magnétique, l'estimation des paramètres de la source (la localisation, la géométrie, le pendage, l'aimantation) est souvent déterminée par des méthodes qualitatives. Par exemple, dans le cas de structure à deux dimensions, l'estimation de l'inclinaison apparente de l'aimantation est faite par essai-erreur, en modifiant l'inclinaison pour une source de géométrie donnée, jusqu'à ce que le modèle ajuste les données. Changer la valeur de l'inclinaison apparente revient à modifier la forme et la répartition des parties positive et négative de l'anomalie.

Grace à de nouveaux développements en algèbre complexe, il est possible de réécrire toutes les fonctions de méthodes potentielles 2D sous forme de fonctions complexes d'une variable complexe. Pour des géométries simples, les expressions mathématiques correspondent à des fonctions puissances (d'ordre 1 pour un dyke, 2 pour un cylindre). Ce formalisme permet également une nouvelle représentation graphique dans le plan complexe pour l'interprétation en méthodes potentielles. Un profil d'anomalie magnétique devient dans le plan complexe une succession de boucles passant par l'origine. Pour un dyke, la géométrie de la boucle est un cercle. L'effet du pendage est une rotation du cercle dans le plan complexe égale au pendage. Les effets de l'inclinaison apparente de l'aimantation et du champ magnétique sont également une rotation des courbes. Par conséquent, avec des données, il n'est pas possible d'estimer à la fois le pendage et l'inclinaison apparente de l'aimantation pour une anomalie due à un dyke. Pour estimer l'inclinaison apparente de l'aimantation, il faut fixer le pendage de la structure.

L'utilisation de ces fonctions complexes sur des données magnétiques est possible en calculant la transformé de Fourier des données et en annulant le spectre pour les fréquences négatives.

Ces nouveaux développements sont appliqués à un dyke cartographié en aéromagnétisme. Les résultats des calculs d'aimantation sont mis en rapport avec les interprétations paléomagnétiques.

**Mots-Clés:** Mots, clés : méthode potentielle magnétique, aimantation, paléo, latitude, dyke

\*Intervenant

## U/Th dated speleothem recorded geomagnetic excursions in the lower Brunhes

Geoffroy Mahieux <sup>\*1</sup>, Jean-Pierre Pozzi <sup>2</sup>, Christophe Falguères <sup>3</sup>, Jean-Jacques Bahain <sup>3</sup>,  
Pierre Deschamps <sup>4</sup>, Louis Rousseau <sup>3</sup>, Qingfeng Shao <sup>5</sup>

1 EA7511 Bassin-Réservoir-Ressource UPJV-UniLaSalle – University of Picardie Jules-Verne – France

2 CNRS UMR 8538 Laboratoire de Géologie – École normale supérieure – France

3 UMR 7194 HNHP, Département Homme et Environnement – Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) – France

4 UMR 161 Géologie et géochronologie – IRD-CEREGE, – France

5 School of Geographical Sciences, Nanjing Normal University – Chine

For the last 20 years, the calcite speleothems have generated increased interest for the recognition of polarity excursions of the Earth's magnetic field. The speleothems show considerable advantages including instantaneous lock-in of the magnetization, they are not affected by post-depositional processes, and they can be dated with the high precision U-series radiometric dating techniques. Here, we present the geomagnetic record in a 2.29-m-long continuous core sampled in a flowstone in Liguria (Italy) and dated to the Lower Brunhes period. This core is an exceptional sample of continental calcite deposits developed from MIS 15 to MIS 7, constrained to 21 U-series (TIMS and MC-ICPMS) dates, processed using the StalAge algorithm. The growth rate is closely related to glacial and interglacial isotopic stages. The magnetic remanence of the core was measured using u-channel and deconvolved using UDECON software. The main magnetic mineral is magnetite in the pseudo-single-domain and single-domain range. Four geomagnetic excursions have been highlighted in the BF2 core at depths 213 cm, 181 cm, 160 cm and 92 cm. If we consider the central or expected dates based on our U-series results, these excursions can be tentatively related to the following well-known excursions: 1) La Palma excursion at 213 cm that we dated to  $583 \pm 28$  ka. 2) Big Lost excursion, at 181 cm dated to  $555 \pm 16$  ka. 3) West Eifel 5 excursion, at 60 cm, dated to  $536 \pm 17$  ka. A fourth excursion, noted 11A, was evidenced at 92 cm and dated to  $420 \pm 10$  ka. These four excursions were identified in only one location, in a flowstone, and using a radiometric dating method, not applicable in sediments so far. This result constrains the chronology and uncertainties of the studied lower Brunhes excursions.

**Mots-Clés:** Speleothem, paleomagnetism, U/Th datation

<sup>\*</sup>Intervenant

## Subsurface configuration of Guercif Basin (Eastern Morocco) using aeromagnetic data

Ibtissam Rezouki <sup>\*1</sup>, Mustapha Boujamaoui <sup>2</sup>, Mohamed Hedi Inoubli <sup>3</sup>, Adnen Amiri <sup>4</sup>,  
 Abdellah Nait Bba <sup>5</sup>, Mohamed Rouai <sup>6</sup>, Ahmed Manar <sup>7</sup>

<sup>1</sup> Moulay Ismail University, Faculty of Sciences of Meknes, Earth Sciences Department, Meknes, Maroc

<sup>2</sup> Department of Geology, Faculty of Sciences and Techniques, Moulay Ismail University, Errachidia, Maroc

<sup>3</sup> Faculté des Sciences de Tunis, Département de Géologie - Tunisie

<sup>4</sup> Department of Geology, Faculty of Sciences Tunis, Tunis El-Manar University, Tunisia - Tunisie

<sup>5</sup> Hassan II University, Faculty of Sciences Aïn Chock, Geosciences Laboratory, BP 5366 Maarif, Casablanca, Maroc

<sup>6</sup> ER Géoexplorations Géotechniques - BP. 11201, Zitoune, Meknès, Maroc

<sup>7</sup> Geology Direction, Ministry of Energy, Mines and sustainable development, Rabat, Maroc

The present study found its importance, firstly by the position of the Guercif Basin in a structural junction between four domains, i) the Rif belt; ii) the Atlas foreland; iii) the Middle Atlas belt and vi) the High plateau of the stable Meseta. Secondly, the geological structures of this basin are mostly covered by Quaternary deposits which make them relatively poorly perceived. The aim of this study is to improve the understanding of the subsurface architecture of the Guercif Basin using aeromagnetic data analysis. To achieve our objective, several filters and edge techniques were applied to the residual magnetic field grid. First of all, an adequate reduce to magnetic pole grid was generated. The obtained map provides informations on the magnetic susceptibility variations mainly attributed to the top of Paleozoic basement undulations under Meso-Cenozoic sedimentary cover. Circular anomalies are also distinguished and can be explained by Tertiary volcanic rocks. However, in order to further study this map, it has been later analysed with several filters those allow evidencing magnetic lineaments such as: the horizontal gradient, the tilt-angle transformation, the theta angle and the Euler deconvolution. The obtained results allow us to establish a structural schematic of the Guercif basin which confirms the existence of structures already recognized or assumed by the classic geological studies, and highlights accidents, as yet, unknown until now. This schematic shows that the fault system of the Guercif basin is organized in three families of directions E-W, NE-SW and NW-SE.

**Mots-Clés:** aeromagnetic data, subsurface architecture, Guercif Basin, Morocco

\*Intervenant

## New paleomagnetic poles from the West African Craton: results on doleritic dikes from Burkina Faso

Sonia Rousse <sup>\*1</sup>, Paul Antonio<sup>ψ</sup>, Lenka Baratoux <sup>2</sup>, Seta Naba <sup>3</sup>, Cécile Cournède <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Geosciences Environnement Toulouse, UR234 IRD, Université Paul Sabatier, Toulouse – CNRS : UMR5563 – France

<sup>2</sup> Geosciences Environnement Toulouse (GET) – CNRS : UMR5563, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR234, Université Paul Sabatier - Toulouse III - 14 avenue E. Belin 31400 Toulouse, France

<sup>3</sup> Université de Ouagadougou (UO) – 03 B.P. 7021 Ouagadougou, Burkina Faso

<sup>4</sup> Centre européen de recherche et d'enseignement de géosciences de l'environnement (CEREGE) – Aix Marseille Université, INSU, Institut de recherche pour le développement [IRD], CNRS : UMR7330 – Europôle Méditerranéen de l'Arbois - Avenue Louis Philibert - BP 80 - 13545 Aix-en-Provence cedex 4, France

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, and new U-Pb baddeleyite data recently constrained their ages. 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. Here we will focus on the paleomagnetic results obtained for 23 sites (210 cores) sampled in the NW- SE generation, recently dated around 1.5 Ga and in the NE-SW generation of CAMP age. 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 will be discussed.

**Mots-Clés:** West African Craton, paleomagnetism, dike

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: Paul.ANTONIO@Get.omp.eu



## **8. PETROLOGIE / MINERALOGIE / GEOCHRONOLOGIE**



## **8.1. Pétrologie et chronologie métamorphique, Pétrochronologie // Métallogénie et hydrothermalisme : du terrain au laboratoire**

## Petrological evolution of a high-P migmatitic orthogneiss in Orlica–Śnieżnik Dome (NE Bohemian Massif)

Carmen Aguilar <sup>\*1</sup>, Francis Chopin <sup>2</sup>, Pavla štípská <sup>1,2</sup>, Karel Schulmann <sup>1,2</sup>,  
Jean-Emmanuel Martelat <sup>3</sup>, Pavel Pitra <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Centre for Lithospheric Research, Czech Geological Survey (cz) – République tchèque

<sup>2</sup> IPG UMR 7516, Université de Strasbourg, ESPE – France

<sup>3</sup> Université Claude Bernard et ENS Lyon, LGL-CNRS UMR5276 – France

<sup>4</sup> Université Rennes 1, CNRS UMR 6118 – Université Rennes – France

Petrological study and pseudosection modelling have been carried out in a high-grade orthogneisses of the southern domain of the Orlica-Sniežnik Dome (NE Bohemian Massif). The studied samples are from an outcrop dominated by vertical foliation with gradual transition from mylonitic augen orthogneiss (Type I) to banded orthogneiss (Type II) with elongated cm-scale quartz and feldspar monomineral layers, passing to schlieren orthogneiss (Type III) with preserved felsic monomineral aggregates, and to nebulitic orthogneiss (Type IV) with faint foliation marked by micas. The field and microstructural observations reveal a first subhorizontal foliation vertically folded and to various degrees reworked by a vertical foliation during E-W lateral shortening. The mineral assemblage of all types consists of biotite, phengite, garnet, quartz, K-feldspar and plagioclase, and accessory apatite, ilmenite, zircon and monazite. The transition from the Type I to IV is characterized by increasing nucleation of interstitial phases along like-like grain boundaries, by a decrease of grain size of all phases and by progressive disintegration of recrystallized K-feldspar grains by embayments of fine-grained myrmekite.

In the mineral equilibria modelling, the core of garnet (alm0.58, py0.02-0.03, grs0.34, sps0.05) and phengite ( $\text{Si} = 3.38\text{--}3.20 \text{ p.f.u}$ ) is consistent with a P-T peak at 10–13 kbar and 720–750°C in the dominant the grt-bt-ph-rt-qtz-pl-kfs mineral assemblage. The garnet (alm0.68, py0.02-0.03, grs0.11, sps0.21) and white mica ( $\text{Si} = 3.10 \text{ p.f.u}$ ) rims together with unzoned biotite ( $\text{XFe} = 0.76\text{--}0.78$ ) compositions match the modelled isopleths in the middle-P part of the grt-bt-ph-ilm-qtz-pl-kfs field to reach the solidus at 7–8 kbar and 630–650°C. In addition, the absence of prograde garnet zoning in the Type I to III suggests that the garnet was completely re-equilibrated during the retrograde history, whereas in the Type IV the HP garnet chemistry was preserved. This is discussed in frame of melt presence in different migmatite types along their P-T path. Based on the mineral equilibria modelling it is argued for fluid/melt-fluxed melting at HP conditions and on exhumation. The migmatite textural types are a result of grain-scale melt migration process and not of a localized melt transport in dykes as known from metasediments.

**Mots-Clés :** high, grade orthogneisses, microtextural relationships, petrological modelling, partial melting, Bohemian Massif

## Characterization of compositional and temperature variations of low-grade metamorphic chlorite and white mica during successive deformation and fluid-rock interaction events: the case of the Bielsa granitic massif (Axial Zone, Pyrenees)

Laura Airaghi <sup>\*1</sup>, Benoît Dubacq <sup>1</sup>, Nicolas Bellahsen <sup>1</sup>, Maxime Waldner <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTeP) – UMR7193, Sorbonne Universités, UPMC Université Paris 6, CNRS - Paris – France

Characterizing the P-T-t conditions of low-grade (< 350°C) fluid-rock interaction events in metagranites can be particularly tricky due to the small size of metamorphic minerals, the rarity of geochronometers and the difficult applicability of the conventional thermobarometry. Such a metamorphism however commonly affects the crystalline basement of the external domains of orogens and its characterization is therefore crucial to reconstruct the geological evolution of a belt. This contribution\* focuses on the Variscan basement of the Bielsa Massif deformed and exhumed during the Alpine orogeny (Axial Zone, central Pyrenees), where the timing and conditions of metamorphism are still poorly constrained. We couple microstructural observations with high-resolution compositional analysis (down to nm scale) to characterize the variations of white mica and chlorite-bearing assemblages in differently deformed protoliths (undeformed up to mylonitic areas).

In low-deformed samples the magmatic mineral assemblage is statically metasomatized, preserving an equigranular texture. The biotite breaks down into chlorite (Chl1), prehnite and rutile, while it is only rarely associated to secondary white mica. This suggests an influx of Ca and Ti and a removal of K by a fluid percolating along microcracks since no preferential fluid channels are observed.

More deformed samples exhibit instead a network of fractures crosscutting Chl1 and filled with secondary chlorite (Chl2) ± white mica. Both Chl1 and Chl2 host a significant amount of Fe, although Chl2 is Si-richer and Fe-depleted compared to the Chl1. The multi-equilibrium modeling returns higher temperatures and lower calculated XFe<sup>3+</sup> values for Chl2 (300-320°C, XFe<sup>3+</sup>=20-30%) compared to Chl1 (250-280°C, XFe<sup>3+</sup>=45-55%). This suggests increasing oxidizing conditions from the first to the second metamorphic event. However, in relatively Fe-rich chlorite, small variation in Fe<sup>3+</sup> may significantly change the temperature estimates. The amount of Fe<sup>3+</sup> in chlorite was therefore measured by XANES at the synchrotron and compared to the calculated values. Note that in some cases, compositional variations in Chl1 can derive from a different reactional history (breakdown of biotite or amphibole), with an apparent decorrelation to temperature changes.

The U-Pb in-situ dating of rutile and titanite associated to Chl1 and of monazite associated to Chl2 will provide insights into the timing and rates of the successive fluid-rock interactions.

\*This study is part of the Orogen research project, a tripartite partnership between academy and industry (Total, BRGM, CNRS).

**Mots-Clés :** metamorphism, chlorite, XFe<sup>3+</sup>, microstructures, Pyrenees, Axial Zone, P, T, Bielsa

## Mineralogical and physicochemical characterization of the Ghassoul clay deposit (Morocco)

Chebila Ameur <sup>\*1</sup>, Jemaa Amakrane <sup>2,3</sup>, Kamel El Hammouti <sup>3</sup>, Bachir Lamouri <sup>1</sup>, Nathalie Fagel <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géodynamique et Ressources Naturelles (LGRN), Département de Géologie, Université Badji Mokhtar-Annaba - Algérie

<sup>2</sup> Argiles, Géochimie et Environnements Sédimentaires (UR AGEs), Département de Géologie B18, Sart-Tilman - Liège - Belgique

<sup>3</sup> Laboratoire des géosciences appliquées(LGA), Département de Géologie, Faculté des Sciences, Université Mohammed Premier, BP 717 Oujda, Morocco - Maroc

This study aims at the mineralogical and physicochemical characterization of clays of the Missour region (Boulemane Province, Morocco). For this, three samples were collected in the Ghassoul deposit. The analyses were carried by X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF) and Scanning Electron Microscopy (SEM). The thermal analysis from 500 to 1100°C was also performed on studied samples, and the fired samples were characterized by XRD and SEM. The XRD results revealed that raw Ghassoul clay consists mainly of Mg-rich trioctahedral smectite, stevensite-type clay, which represents from 89% to 95% of the clay fraction, with a small amount of illite and kaolinite. The associated minerals are variable amount of quartz, dolomite, hematite, gypsum and K-feldspars. The chemical analysis confirms the presence of Mg-rich smectite (stevensite) with largest amount in sample containing the highest MgO. The SEM micrographs revealed the presence of automorphous structures with petals-like shape typical of smectite. The Thermal transformations determined by X-ray diffraction indicated that stevensite was transformed to enstatite from 800°C. Diopside starts to appear from 700°C, which is confirmed by SEM observations, and the quartz is transformed to cristobalite when the temperature exceeds 1100°C.

**Mots-Clés :** Clay, Ghassoul, Characterization, Stevensite, Morocco.

## Empreinte thermique des fluides minéralisateurs à l'interface socle couverture

Jocelyn Barbarand <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Benjamin Brigaud <sup>1</sup>, Cécile Gautheron <sup>1</sup>, Guillaume Delpech <sup>1</sup>, Claire Boukari <sup>1</sup>, Rosella Pinna-Jamme <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Paris-Sud (GEOPS) – CNRS : UMR8148, Université Paris XI - Paris Sud – Orsay - France

Les fluides circulant à l'interface entre un socle et une couverture sédimentaire peuvent être à l'origine de gisements importants pour U, Pb-Zn et F-Ba. Ces circulations sont attestées par des paragénèses particulières et sont caractérisées par des fluides riches en sels (Na, Ca) en liaison avec des saumures, issus souvent du mélange de différents types ou générations de fluide et avec des températures assez élevées (70-200°C). L'objectif de cette étude est de déterminer par la thermochronologie basse température (traces de fission et (U-Th-Sm)/He sur apatite) qui est sensible à des températures dans la gamme 50-120°C si les fluides minéralisateurs ont produit une empreinte thermique lors de leur passage. Il serait ainsi possible de dater le passage du fluide et d'estimer sa durée grâce aux cinétiques de cicatrisation des traces de fission ou de diffusion de l'hélium. La datation des minéralisations constitue un élément important dans la compréhension des modèles métallogéniques et peu de méthodes permettent d'aborder ce point. Des échantillons de socle et de couverture sédimentaire détritique ont été prélevés dans différents sites minéralisés (Pierre Perthuis, plateau d'Antully, Chitry les Mines, Courcelles Fremoy) en fluorite-barite-quartz sulfures dans le district du Morvan et à différentes profondeurs par rapport à cette interface socle-couverture. Ces résultats sont comparés à des données régionales qui caractérisent l'histoire thermique du socle depuis le Trias (Barbarand et al., 2013). Les premiers résultats acquis illustrent que les deux thermochromomètres sont sensibles à la présence des minéralisations avec des âges systématiquement plus jeunes à proximité des gisements. Si les âges traces de fission dans le massif sont en général compris dans l'intervalle 180-220 Ma, les âges obtenus à proximité des gisements est compris entre 90 et 120 Ma. Une gamme d'âge proche est mesurée par la thermochronologie (U-Th-Sm/He) avec des âges individuels compris entre 79 et 148 ± 10 Ma. Il apparaît ainsi que les échantillons proches (< 20m) des minéralisations enregistrent des températures plus élevées que celles déterminées pour les échantillons lointains. L'âge des circulations pourrait être ainsi défini grâce à l'inversion des données et comparé aux données déjà disponibles acquises par la datation Sm/Nd des fluorines. Ces données constituent également un cas d'école pour l'interprétation des données de thermochronologie basse température pour lesquelles l'hypothèse de l'existence d'une colonne de roche suivie de son érosion ultérieure à l'origine des températures plus élevées est généralement privilégiée.

**Mots-Clés :** thermochronologie base température, âge des circulations de fluides

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: jocelyn.barbarand@u-psud.fr

## Significance of $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ ages in highly strained zones: insights from dating of phengite from the East Tenda Shear Zone (Tenda massif, Corsica, France)

Alexandre Beaudoin \*<sup>1</sup>, Stéphane Scaillet \*<sup>1</sup>, Laurent Jolivet \*<sup>2</sup>, Romain Augier \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO UMR 7327) – Université d'Orléans, CNRS : UMR7327, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

<sup>2</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTEPI – UMR7193, Sorbonne Universités, UPMC Université Paris 6, CNRS - Paris – France

In radiometric geochronology, ages correspond to the time elapsed since thermal diffusion of the daughter element in a given system became negligible after cooling under the closure temperature ( $T_c$ ). Depending on the range of possible  $T_c$  for a given father-daughter couple, radiometric systems are differentially used to date cooling of crystals under their  $T_c$  or crystallization if it happened under the  $T_c$ . Since the 1990s, with the help of  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  methods, the  $40\text{K}-40\text{Ar}$  system has been widely used to date metamorphic or deformation events, by analyzing respectively syn-metamorphic or syn-kinematic minerals. In the case of deformation and shear zones, significance of ages (i.e. cooling or crystallization) appears to be ambiguous because as the shear zone operates and evolves, extrinsic and intrinsic parameters controlling  $T_c$  can be highly variable. In this study, we consider the significance of  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  ages in highly strained zones, taking for example the well-known East Tenda Shear Zone, which developed during burial and exhumation of the Tenda massif, a part of the European margin, beneath the Schistes Lustrés nappe, a metamorphosed part of the Ligurian Ocean. Microstructures, chemical composition of phengite, step-heating and *in situ* ages on phengite have been studied and acquired on different deformation grades through different strain gradient characterized on the field. The aim is to study deformation history of phengite aggregates and variation of intrinsic parameters controlling  $T_c$  (i.e grain size and chemical composition) across these cross sections. Results show links between deformation and ages that can be intuitive (i.e. a younging of ages in the younger structures or toward more and more deformed rocks) or counter intuitive, from small (i.e. 1 cm) to regional scale. We discuss the difficulty in interpreting ages in terms of deformation history versus cooling, taking into account the effect of variation of heritage amount, grain size, chemical composition and history of fluid circulations. This study shows the importance of massive sampling across a given shear zone, in order to evaluate the influence of all parameters controlling ages, and better interpret ages.

**Mots-Clés :**  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  dating, shear zone, deformation, significance of ages, strain gradient, East Tenda Shear Zone, Tenda massif, Corsica

## Alkali pyroxene and amphibole as monitor of concentration and fractionation processes of Rare Earth Elements in peralkaline granites

Cyrielle Bernard <sup>\*1</sup>, Didier Beziat <sup>1</sup>, Guillaume Estrade <sup>1</sup>, Stefano Salvi <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR234, CNRS : UMR5563, Université Paul Sabatier - Toulouse III – France

Peralkaline granites are rich in rare metals such as the REE and high-field-strength elements (HFSE, namely Nb, Ta, Zr, Hf, U, Th, Sn, Ti), and represent potentially important resources, particularly for the heavy REE (Dostal, 2017). The highest rare-metal concentrations are usually found in pegmatite in which mineralization consists of a variety of rare-metal bearing minerals. The main mechanism responsible for the high rare-metal content in peralkaline melts is known to be magmatic, i.e., mainly controlled by differentiation, however the processes controlling light REE - heavy REE fractionation are still vastly discussed (Chakhmouradian and Zaitsev, 2012). The main question is the role played by hydrothermal fluids in remobilizing and fractionating REE and HFSE. Indication for the presence of fluids are secondary mineral pseudomorphs with exotic chemistry (e.g. REE-fluorcarbonates, zirconosilicates, phosphates, oxides) replacing primary phases.

In peralkaline granites, alkali pyroxene and amphibole contain significant amounts of REE and HFSE and are thus perfect candidates to monitor their behaviour from magmatic to hydrothermal stages. We analysed pyroxene and amphibole in peralkaline pegmatites from three alkaline complexes, namely, Ambohimirahavavy and Manongarivo in Madagascar, and Amis in Namibia, to understand how REE and HFSE behave. In all complexes, pyroxene is zoned, with a core enriched in REE, Zr, Hf, Sn, Li whereas amphibole is unzoned. In pyroxene, light and heavy REE are systematically fractionated between core and rim. In both Malagasy complexes, the smaller the ionic radius of the REE, the higher their fractionation; in Manongarivo, the light and heavy REE show, respectively, a 60 and 80 % depletion from core to rim, while the depletion is 25 to 50 % in Ambohimirahavavy. In Amis, the fractionation trend is reversed, from 70 to 0%.

It is unlikely that the decreasing rare-metal content from core to rim in pyroxene resulted from magmatic processes. In Madagascar, the close association of zoned pyroxene with pseudomorphs points to a hydrothermal origin for the pyroxene rims. Although pseudomorphs were not observed at Amis, similar zoning patterns in pyroxene suggest hydrothermal rim precipitation for this complex, as well. We thus propose that late-stage exsolution of a hydrothermal fluid is a common process in peralkaline pegmatites and that this process has a strong potential for transporting and fractionating at least some rare metals.

Chakhmouradian, A.R., Zaitsev, A.N., 2012. Rare earth mineralization in igneous rocks: sources and processes. *Elements* 8, 347–353.

Dostal, J., 2017. Rare Earth Element Deposits of Alkaline Igneous Rocks. *Resources* 6, 34.

**Mots-Clés :** peralkaline granite, REE, pyroxene, hydrothermal fluids, pegmatite, fractionation

## Mineralogical and seismic properties of serpentinite of Ait Ahmane fault zone of Bou Azzer ophiolite, Central Anti-Atlas of Morocco

Mohamed Bhilisse <sup>\*1</sup>, Haemyeong Jung <sup>2</sup>, Hassan Admou <sup>1</sup>, Lhou Maacha <sup>3</sup>, Ali Aydda <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Geology, Faculty of Sciences-Semlalia, Cadi Ayyad University – Maroc  
<sup>2</sup> School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National Univ., Seoul 151-747 – Corée du Sud  
<sup>3</sup> Managem mining Company (SA), Twin Center, Casablanca – Maroc

In Bou Azzer, two major serpentinization stages Pan-African orogen are observed: Pseudomorphic Precoce stage: materialized by the isotropic serpophite preserving the primary form of olivine crystals, often with needles antigorite. Brucite is fairly frequent, as micrometric inclusions in other serpentine minerals as antigorite and serpophite and tectonic late stage: materialized by framework or parallel veins and fractures filled by chrysotile. These minerals are often crosscutting the antigorite, serpophite and brucite crystals. The microscopic and Raman analyses confirm that the investigated serpentinite rocks suffered of a variable degree of serpentinization and the dominant variety of serpentine mineral is antigorite. The crystal preferred orientation (CPO) results show that the [001] axes of antigorite deformation are aligned subnormal to the foliation while the [010] axes are mostly aligned subparallel to the lineation, which are significantly different of that's produced in the recent high-pressure experiment. The seismic anisotropy results of shear waves are large, the sample with the lowest serpentine content (30%) shows the lowest P- and S-wave anisotropy ( $V_p=7.2\%$  and  $AVs=6.55\%$ ), and the sample with the highest content of serpentine (85%) shows the highest P-wave and S-wave anisotropy ( $V_p=8.6\%$  and  $AVs=11.06\%$ ). These results reflect that the seismic anisotropy increases with antigorite volume fraction. In addition, effects of the serpentinization degree and composition on seismic anisotropy are shown in the equal and lower areas of hemisphere projections.

**Mots-Clés :** Serpentinization. Antigorite. Seismic anisotropy. Seismic velocities. CPO. Ait Ahmane



## La topaze, un potentiel traceur des minéralisations à métaux rares ?

Loïc Bouat <sup>\*1</sup>, L. Monnier <sup>2,1</sup>, J. Melletton <sup>1</sup>, P. Lach <sup>1</sup>, L. Bailly <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Univ. Orléans, CNRS, BRGM, ISTO, UMR 7327, Orléans – France

<sup>2</sup>Univ. Toulouse, GET, OMP, UMR 5563 – Toulouse - France

Les gisements à métaux rares (Li, Ta, Be, Sn, W) d'Europe de l'Ouest de la Chaîne varisque sont très souvent associés à la topaze (Massif Central, France ; Chaîne Ibérique, Portugal et Espagne). Ce silicate fluoré est un minéral fréquent des pegmatites et granites peralumineux très différenciés, à la fois au stade magmatique mais aussi aux stades hydrothermaux postérieurs à l'exsolution du fluide orthomagmatique (stockwork, greisen). Sa grande dureté (8 sur l'échelle de Mohs) lui permet aussi d'être bien préservée dans les sédiments alluvionnaires, sur de relatives grandes distances à partir de sa roche primaire. L'échantillonnage alluvionnaire de topaze dans un environnement propice et son analyse géochimique pourrait ainsi constituer un guide régional quant au type de gisement disponible dans le bassin versant amont.

Les objectifs de ce travail sont de déterminer si la topaze enregistre une signature géochimique particulière en fonction de son environnement géologique de cristallisation (pegmatite et granite à métaux rares, greisen, stockwork, ...) et des métaux associés. Pour cela, des analyses par ablation laser (LA-ICP-MS) ont permis de définir la composition de la topaze dans plusieurs contextes, minéralisés ou non, magmatiques ou hydrothermales et sur roches primaires et sédiments alluvionnaires. L'analyse statistique de ces résultats permet de déterminer la carte d'identité géochimique de la topaze selon son environnement de cristallisation.

Cette première base de données pourrait permettre de considérer ce minéral comme un potentiel outil dans l'exploration des gisements à métaux rares des contextes magmatiques peralumineux.

**Mots-Clés :** topaze, LA, ICP, MS, signature géochimique, minéral traceur, gisements à métaux rares

## Nouvelles données géologiques et contrôles structuraux des minéralisations à Eléments de Terres Rares du district minier de Gakara, Burundi

Philippe Boulvais <sup>\*1</sup>, Yannick Branquet <sup>\**1,2*</sup>, Cesare Morelli<sup>*φ3*</sup>, Joël Ntungwanayo <sup>*§3*</sup>, Gilbert Midende <sup>*¶3,4*</sup>, Seconde Ntiharirizwa <sup>*1*</sup>

<sup>1</sup> Univ. Rennes 1 - Géosciences Rennes (UR1) OSU Rennes - CNRS : UMR6118 - France

<sup>2</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO) - Université d'Orléans, CNRS : UMR7327, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - Orléans - France

<sup>3</sup> Rainbow Rare Earths - Burundi

<sup>4</sup> Université du Burundi - Burundi

Le district minier à Eléments de Terres Rares (ETR) de Gakara au Burundi, situé sur l'épaule orientale de la branche ouest du Rift, fait actuellement l'objet d'intenses travaux d'exploration et d'exploitation. De nouveaux affleurements permettent d'en améliorer considérablement la connaissance géologique. Ainsi nous avons pu établir que : i) les gneiss encaissants, d'âge Kibarien (1375 à 985 Ma), ortho- ou paradrivés sont affectés par une déformation ductile correspondant à des couloirs de cisaillement. Certaines zones de déformation sont sub-solidus, diagnostiques d'une mise place syn-tectonique des protolithes granitiques; ii) ces granitoïdes déformés sont probablement issus d'une fusion partielle des métasédiments avoisinants. De larges champs de pegmatites kibariennes, stériles en métaux à Gakara, s'injectent fréquemment dans la foliation des gneiss et sont également affectées par des déformations sub-solidus et à l'état solide (mylonites); iii) les veines d'ETR se mettent en place à la faveur de toutes ces d'hétérogénéités mécaniques kibariennes (zone de cisaillement, pegmatites) qui sont "ré-ouvertes". Les pendages et directions de ces veines sont très variables de l'échelle du district à celle de la mine. Certaines veines sont courbes avec des épaisseurs et pendages variables évoquant des géométries 3D de filons hypo-volcaniques; iv) les textures des veines d'ETR ne montrent pas de cisaillement ductile, mais de la cataclase et de la fracturation hydraulique synchrone de la circulation des fluides minéralisateurs; d'autres veines massives d'ETR non cataclasés présentent des textures "pegmatitiques", multidirectionnelles entre quartz et bastnaésite; v) une déformation postérieure à la minéralisation fragmente ces veines d'ETR, le corps minéralisé correspondant alors à une cataclasite où des fragments de veines d'ETR sont remaniés. Ces nouvelles données acquises au cours d'un doctorat en partenariat avec l'industriel minier Rainbow Rare Earths (thèse de Seconde Ntiharirizwa, Université de Rennes 1,) pose les bases d'un modèle métallogénique de plus en plus constraint (e.g. âge de minéralisation à ca. 600 Ma (résumé Ntiharirizwa et al., cette session, inclusions fluides et isotopes stables (résumé de Boulvais et al., cette session))). En particulier, il sera présenté et discuté les hypothèses les plus tenables relatives au modèle structural et hydrodynamique en rapport avec le cadre tectonique panafricain de ce segment de la branche ouest du Rift.

**Mots-Clés :** Eléments de Terres Rares, minéralisation, Géologie de terrain, Gakara, Burundi

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: [yannick.branquet@univ-orleans.fr](mailto:yannick.branquet@univ-orleans.fr)

## Les fluides minéralisateurs en Eléments de Terres Rares du gisement de "classe chinoise" de Gakara, Burundi

Philippe Boulvais <sup>\*ψ1</sup>, Vanessa Esono <sup>φ 1</sup>, Marie-Christine Boiron <sup>§2</sup>, Michel Cathelineau <sup>¶2</sup>,  
 Yannick Branquet <sup>12,3</sup>, Cesare Morelli <sup>\*\*4</sup>, Ntungwanayo Joël <sup>ψψ4</sup>, Gilbert Midende <sup>φφ4,5</sup>,  
 Seconde Ntiharirizwa <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ. Rennes 1 - Géosciences Rennes - CNRS : UMR6118 – France

<sup>2</sup> Univ. de Lorraine, CNRS, CREGU, GeoRessources – Univ. de Lorraine, CNRS, CREGU, GeoRessources,  
 Vandoeuvre lès Nancy, France

<sup>3</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO) – Université d'Orléans, CNRS : UMR7327, Bureau de Recherches  
 Géologiques et Minières (BRGM) – Orléans - France

<sup>4</sup> Rainbow Rare Earths – Burundi

<sup>5</sup> Université du Burundi – Burundi

Le gisement d'Eléments de Terres Rares (ETR) de Gakara, Burundi, est d'origine hydrothermale. A une bastnaésite primaire se superpose une altération monazitique en association avec laquelle se développent de larges cristaux de quartz automorphes. Bastnaésite et quartz contiennent de superbes inclusions fluides, extrêmement variées en nature. Les résultats de la caractérisation de ces inclusions fluides et d'une étude isotopique pionnière en oxygène et carbone sur la bastnaésite sont présentés ici, et participent à l'établissement d'un modèle métallogénique global, encore en cours d'établissement (thèse de Seconde Ntiharirizwa, Université de Rennes 1). Les inclusions fluides contenues dans la bastnaésite et le quartz sont, aquo-carboniques, aquo-carboniques à solides (nombreux et variés), carboniques et aqueux. Toutes sont majoritairement primaires à pseudo-secondaires. La température d'homogénéisation varie de 250°C, jusqu'à plus de 400°C. Les salinités varient également fortement, de 5 à 50 pds% eq. NaCl comme le montre la présence de cubes de sels. La phase volatile est quasi-exclusivement constituée de CO<sub>2</sub>, avec une contribution mineure de N<sub>2</sub>. Les conditions de piégeage estimées à partir du calcul des isochores sont compatibles avec une minéralisation dans la croûte supérieure telle que suggérée par les observations de terrain (voir résumé Branquet et al., cette session), à des températures supposées de 400 à 450°C. Il n'y a que peu de différence entre les IF contenues dans les deux minéraux, indiquant une continuité dans l'histoire de minéralisation et d'altération.

Les analyses en isotopes stables (O et C) de la bastnaésite constituent un challenge analytique, en l'absence de standard international de bastnaésite. Nous avons développé un protocole original, utilisant un bain d'huile végétale, par lequel nous obtenons des valeurs d<sup>18</sup>O entre 11 et 16‰, compatibles avec une formation à assez haute température à partir de fluides magmatiques, et des d<sup>13</sup>C entre -12 et -16‰, indiquant un fractionnement des isotopes du carbone au cours de processus de séparation de phases fluides, suggérées par la coexistence de fluides à CO<sub>2</sub> avec des inclusions très salées.

L'ensemble des résultats est compatible, renforce même, l'interprétation du gisement de Gakara à partir de fluides dérivés d'une intrusion alcaline en profondeur, telle que la région des Grands Lacs a réussi à en produire régulièrement ce dernier milliard d'années.

**Mots-Clés :** Elements de Terres Rares, minéralisation, inclusions fluides, isotopes stables, Gakara (Burundi)

## Polycyclic Paleozoic tectono-metamorphic evolution of the Kalasu area (NW Chinese Altai)

Arnaud Broussolle <sup>\*1</sup>, Min Sun <sup>1</sup>, Carmen Aguilar <sup>2</sup>, Karel Schulmann <sup>2,3</sup>, Pavla štípská <sup>2,3</sup>, Yingde Jiang <sup>4</sup>, Yang Yu <sup>4</sup>

<sup>1</sup> The University of Hong Kong, Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong, China (HKU) – R.A.S. chinoise de Hong Kong

<sup>2</sup> Centre for Lithospheric Research, Czech Geological Survey, Praha 1, Czech Republic – République tchèque

<sup>3</sup> Université de Strasbourg, ÉOST, IPGS – CNRS UMR7516, Institut de Physique du Globe de Strasbourg – France

<sup>4</sup> Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China – Chine

The Kalasu area in the southern part of the Chinese Altai is composed predominantly of Devonian felsic metavolcanic rocks in the NE and of Cambro-Ordovician metapelitic sequence with subordinate Devonian metavolcano-clastics. The area is divided into upper, middle and lower crustal orogenic levels according to their metamorphic grade and structural patterns. Metamorphism increases from muscovite and biotite zones in the upper crustal level to garnet-staurolite-sillimanite zones in the middle level and to sillimanite-cordierite-K-feldspar zone in the lower crustal level. Structural succession is: a sub-horizontal S1 foliation folded by NE-SW open to tight and upright F2 folds (with no metamorphism associated) and reworked by an orthogonal D3 deformation, characterized by NW-SE open to close F3 folds with moderately plunging axes, steeply dipping S3 axial planes and S3 cleavage. Early Devonian calc-alkaline granitoids intruded the sequence parallel to S1, whereas Permian undeformed gabbroic bodies were emplaced in the lower crust and granites in the upper crust coevally with D3.

In the upper crustal level the garnet-bearing schists are composed of g-bi-pl-q-ilm, with biotite and ilmenite parallel to S1 foliation, gently folded by F3. The F3 folding is connected with low-grade S3 cleavage marked by biotite. Small garnet porphyroblasts have oriented ilmenite inclusion trails parallel to S1. In the middle crust, the dominant lithology is migmatitic paragneiss with relicts of st-g-ru parallel to S1 and with ksp-bi-mt-bearing leucosomes defining the S3 cleavage. Big staurolite porphyroblasts have S1 oriented inclusions of pl-ilm-ru and include garnet. The lower crust is characterized by sill-ksp-cd-bearing migmatites. The S1 foliation is locally distinguished by ky-st inclusions in garnet, and the S3 is marked by presence of cordierite-bearing leucosome and by orientation of sill-bi-g in the melanosome. These microstructural relationships suggest that the early LP-LT to HP-LT metamorphism is associated to Early Devonian D1 deformation and the UHT-HT metamorphism took place during Permian D3 reworking.

Acknowledged are projects Hong Kong RGC 17303415, 17302317, HKU CRCG HKU704013P, 17303415.

**Mots-Clés :** Chinese Altai, CAOB, metamorphic petrology

## Le stade initial du dépôt de la wolframite dans le gisement à W-Sn-Cu de Panasqueira (Portugal) : caractérisation indirecte des fluides par l'étude des tourmalines précoce

Eleonora Carocci <sup>\*ψ1</sup>, Christian Marignac<sup>φ1</sup>, Michel Cathelineau <sup>1</sup>, Marie-Christine Boiron <sup>1</sup>,  
Chantal Peiffert <sup>1</sup>, Filipe Pinto <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de Lorraine, CNRS, CREGU, GeoRessources, Vandoeuvre les Nancy – Université de Lorraine – France

<sup>2</sup> Beralt-Tin and Wolfram, S.A. Barroca Grande, Portugal – Portugal

Le gisement de classe mondiale à W-Sn-Cu de Panasqueira (ClZ) est formé de veines sub-horizontales à Qtz-Wfm-Cst-Ms-Toz-sulfures. Le stade principal de dépôt du W y est précédé par un épisode de tourmalinisation des épontes schisteuses. Les prismes de tourmaline (50-150  $\mu\text{m}$ ,  $\leq 500 \mu\text{m}$ ) fossilisent la schistosité des protolithes et sont systématiquement zonés, avec un cœur (Tur0) et des zones concentriques (Tur1a et b), respectivement pré- et syn- "crack-seals" précoce à quartz. La tourmaline, accompagnée par un W-rutile, est contemporaine des wolframites précoce. L'initialisation du système avant le dépôt majeur du W est daté ( $\text{U}/\text{Pb}$ , Rt) à  $305.2 \pm 5.7$  Ma. Ces tourmalines vont de Fe-dravite à schorlite avec des composantes foitite et oxy-foitite. De Tur0 à Tur1b, F apfu et Fe# augmentent régulièrement ( $F \leq 1\%$ ). Les éléments-traces, mesurés par LA-ICP-MS, sont (en ppm) : Ti ( $\leq 2500$ ), Zn ( $\leq 931$ ), Mn ( $\leq -606$ ), Li ( $\leq 685$ ), V ( $\leq 472$ ), Cr ( $\leq 624$ ), Sr ( $\leq 825$ ), Sn ( $\leq 92,1$ ), Sc ( $\leq 92,1$ ), Be ( $\leq 21,2$ ), Pb ( $\leq 18,7$ ), Ni ( $\leq 56,1$ ), Co ( $\leq 14,3$ ), Y ( $\leq 20$ ), W ( $\leq 60$ ), Nb ( $\leq 52$ ) et Ta ( $\leq 6$ ). La comparaison des teneurs entre Tur1a et Tur1b montre que deux fluides sont impliqués dans la tourmalinisation : L1, présent dès le début, est caractérisé par Co-Cu-Pb-Sc-Sr-V-Cr-W-Nb-Ta; L2, qui se mélange progressivement avec L1, est caractérisé par Li-Zn-Mn-Fe-F. La déplétion en W qui caractérise Tur1b s'interprète par la concurrence avec les W-Rt et la Wfm précoce.

La comparaison montre que L1 a vraisemblablement une origine métamorphique, ce que confirment les spectres de terres rares des tourmalines. L'origine de L2 est plus problématique, la signature est suggestive d'une relation avec un granite. Cependant, les métaux rares (W, Sn, Nb et Ta) semblent apportés par L1. En outre, l'analyse détaillée des tourmalines et des rutiles montre des comportements opposés entre le W et Nb, Ta, Sn ce qui suggère des sources contrastées.

Au stade de la tourmalinisation, et contrairement à des affirmations récentes (Codeço et al., 2017 ; Lecumberri-Sánchez et al., 2017), le système hydrothermal est ouvert, et tous les éléments nécessaires à la cristallisation de la wolframite sont apportés par les fluides, en particulier le Fe et le Mn qui sont clairement apportés par L2. Les causes de la précipitation du W, que l'on ne peut donc pas attribuer à l'interaction fluide-roche (Lecumberri-Sánchez et al., 2017), restent à déterminer.

Lecumberri-Sánchez et al (2017) Geol 45, 579-582  
Codeço et al (2017) Chem Geol, 468, 1-16

**Mots-Clés :** Panasqueira, tourmaline, rutile, datation, fluide, éléments traces, LA\_ICP\_MS

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: eleonora.carocci@univ-lorraine.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: christian.marignac@univ-lorraine.fr

## The La Bellière gold-antimony district: new data and implications on the relationship between Au and Sb in the Armorican Massif

Florent Cheval-Garabédian <sup>\*ψ1,2</sup>, Michel Faure <sup>1</sup>, Jérôme Gouin <sup>3</sup>, Eric Marcoux <sup>1</sup>, Maxime Picault <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans - UMR7327 (ISTO) – Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) : UMR7327 – France

<sup>2</sup> E-Mines (10 all des Ecoles, 09600 Dun) – E-Mines – France

<sup>3</sup> Variscan Mines – 16 Rue Leonard de Vinci, 45100 Orléans, France

Numerous gold (Au) and antimony (Sb) vein deposits have been mined in France mainly in the Variscan domain (French Massif Central and Armorican Massif). Most of them display a close relationship, being either spatially associated within the same district (La Bellière district or Limousin district), or being present in a same vein (La Lucette district). The La Bellière district (southern part of Armorican Massif) is the third major gold district of France (11tonnes produced from 1905 to 1952). It shows Au bearing quartz veins neighboring with a complex network of Sb veins, in the Neoproterozoic metasedimentary basement of the Mauges Nappes. The genetic model, mostly the relation between Au and Sb, remaining poorly understood, new field data, mineralogical and geochronological analyses have been carried out to better constrain the metallogenic model.

Gold-bearing quartz veins are hosted by N60°E to N90°E faults with senestral strike-slip kinematic. They exhibit a three-stage paragenesis: 1) arsenopyrite-pyrite, 2) polymetallic and gold after a ductile-brittle deformation and 3) a late brittle stage with pyrite-carbonate. These results support a continuous evolution from a deep level of emplacement to a shallower one. The overall features of the gold veins are close to those of mesothermal orogenic gold deposits. Sb veins are hosted in a complex N20°W-20°E extensional set of veins controlled by N10-140°E regional dextral strike-slip shear zone. The first stage consists of an early pyrite-arsenopyrite with microcristallin quartz, followed by a late stage with stibnite-berthierite in geodic quartz.

Structural and mineralogical results are in favor of two-step hydrothermal event, an early gold event at a deep level being followed by a late shallower Sb event. Chronologically, gold veins appear related to a NE-SW maximum shortening direction of Tournaisian-Visean age. The Sb-bearing veins are tension gashes generated by N-S shortening of probable Late Carboniferous age. New U/Pb dating on hydrothermal apatites from the la Bellière ore are in progress to confirm this chronology. It is proposed that the La Bellière gold step is older than the "Or 300" event, while the Sb step is dissociated from this earlier gold step and could correspond to so-called "epizonal" in the orogenic Au model.

**Mots-Clés :** Orogenic gold, shallow Sb mineralization, structural control, La Bellière district, Or300 hydrothermal event, Armorican Massif

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: florent.cheval-garabedian@etu.univ-orleans.fr

## Pétro-chronologie des intrusions magmatiques et du métamorphisme général de bas-degré du varisque marocain

Francis Chopin \*<sup>1,2</sup>, Jean Zielinski <sup>2,3</sup>, Karel Schulmann <sup>1,2</sup>, Jean-François Ghienne <sup>1</sup>, Martin Simon <sup>1</sup>,  
 Ryma Chebli <sup>1</sup>, Mohamed El Houicha <sup>4</sup>, Juraj Francú <sup>5</sup>, Frantisek Laufek <sup>6</sup>, Marek Szczerba <sup>7</sup>,  
 Jitka Míková <sup>2</sup>, Rémi Leprêtre <sup>8</sup>, Dominique Frizon De Lamotte <sup>8</sup>

<sup>1</sup> Université de Strasbourg, ÉOST, IPGS - CNRS UMR7516 - Université de Strasbourg, ESPE - France

<sup>2</sup> Czech Geological Survey, Praha, Czech Republic - République tchèque

<sup>4</sup> Faculté des Sciences (LGG), Université Chouaïb Doukkali, El Jadida - Maroc

<sup>5</sup> Czech Geological Survey, Brno - République tchèque

<sup>6</sup> Czech Geological Survey (CGS) - Geologicka 6, 152 00 Prague 5, République tchèque

<sup>7</sup> Institute of Geological Sciences, Polish Academy of Sciences, Research Centre in Cracow - Pologne

<sup>8</sup> Laboratoire Géosciences et Environnement Cergy, Université de Cergy-Pontoise, Neuville-sur-Oise (GEC) - EA4506 - France

Ce travail présente des données issues de la quantification pétro-chronologique (pétrologie Chl-Mu, datations K-Ar) du métamorphisme de bas-degré de divers massifs varisques marocains (Jebilet, Haute-Moulouya, Tazekka, Khénifra). Y sont associés de nouvelles datations LA-ICPMS U/Pb sur zircons des intrusions de Jebilet (Oulad Ouaslam) et de Haute-Moulouya et une quantification PT (pseudosections) du métamorphisme de contact associé. La chimie des chlorites et muscovites/argiles de la schistosité principale de ces massifs montre un gradient métamorphique de bas-degré à faible pression et relativement haute température compatible avec un gradient métamorphique d'environ 35° C/km. Les âges K-Ar de fractions fines argileuse (< 0.2µm) de différents échantillons montrent des âges répartis entre deux populations : 240– 250Ma et 270–305 Ma. L'âge des intrusions magmatiques est de 330–340Ma, et le métamorphisme de contact précoce associé montre un pic à 0.75–1.5 kbar et 575–675 C. De nouvelles datations en cours permettront de préciser ces données. Ces résultats permettront de discuter les événements marocains dans le cadre plus général de la chaîne varisque. L'hypothèse du démembrément de Gondwana jusqu'au début Carbonifère (événement extensif éovarisque) et la collision tardい-carbonifère-permienne seront particulièrement discutés à la lumière ces nouvelles données pétro-chronologique.

**Mots-Clés :** Maroc, varisque, KAr, U/Pb, pseudosection, métamorphisme de bas degré, magmatisme

## Combined structural-petrochronological study of Devonian eclogite from the Mariánské Lázně Complex (Bohemian Massif): New constraints on the timing of HP and HT events by garnet petrochronology

Stephen Collett <sup>\*1</sup>, Pavla štípská <sup>1,2</sup>, Vít Peřestý <sup>3</sup>, Karel Schulmann <sup>1,2</sup>, Jeremie Soldner <sup>4</sup>, Robert Anczkiewicz <sup>5</sup>, Ondrej Lexa <sup>3</sup>, Andrew Kylander-Clark <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Centre for Lithospheric Research (Czech Geological Survey) – République tchèque / <sup>2</sup> Institut de physique du globe de Strasbourg (IPGS) – université de Strasbourg, INSU, CNRS : UMR7516 – France / <sup>3</sup> Institute of Petrology and Structural Geology (Charles University in Prague) – République tchèque / <sup>4</sup> Guangzhou Institute of Geochemistry (Chinese Academy of Sciences) – Chine / <sup>5</sup> Institute of Geological Sciences, Polish Academy of Sciences, Research Centre in Cracow – Pologne / <sup>6</sup> Department of Earth Science (University of California USA)

Garnet is an exceptional petrochronometer - it is stable over a wide range of pressure-temperature-composition (P-T-X) conditions and its solid-solution behaviour is thermodynamically well constrained; it often shows textural and chemical zonation providing insight into a rocks tectonometamorphic evolution; and it can be directly dated using the Sm-Nd and Lu-Hf isotopic systems, whose contrasting systematics often yield two different, but geologically significant, ages. We present a garnet petrochronology study of eclogite from the Mariánské Lázně Complex (MLC) in the Bohemian Massif. Two representative samples have undergone detailed petrochronological study. A least retrogressed sample contains relict kyanite, omphacite (Jd33-36), and inclusion-poor garnet porphyroblasts. Garnet shows flat compositional zoning (Alm33Prp38Grs25) within its core; a zoned mantle region (to: Alm37Prp43Grs18), and sharp variation (Alm42Prp39Grs18) at the very rim. Garnet cores and rare phengitic white mica (3.33 Si p.f.u.) inclusions in omphacite enable constraint of peak eclogite-facies conditions at ~25 kbar and 650–750°C. Kyanite (by plagioclase and spinel), omphacite (by amphibole, clinopyroxene, and plagioclase), and garnet (by amphibole and plagioclase) all show partial replacement by symplectite or coronitic intergrowths. P-T modelling of these replacement textures, and detailed study of a more retrogressed sample – garnet-bearing, but without relict omphacite or kyanite – indicate a HT overprint (> 800°C) at the base of the lower crust followed by combined cooling and decompression. Garnet geochronology applied to both samples yielded older (~390 Ma) ages for the Lu-Hf method than the Sm-Nd method (~375 Ma). As Lu is concentrated within the garnet core, ages reported by the Lu-Hf method are interpreted to record the HP event. Whereas, temperatures for the HT overprint exceed the typical closure temperature of the Sm-Nd system and this combined with more diffuse Sm zoning patterns means that the Sm-Nd ages are interpreted to date cooling following the HT overprint. Structural measurements collected from across the MLC indicate a trend of steep eastwards dipping foliations associated with the HP (S1) and HT (S2) events transitioning into shallower (S3) fabrics associated with the retrogression. These data and the petrochronological results indicate a relatively rapid (~15 Ma) transition from oceanic HP subduction through HT Barrovian-thickening to extensional exhumation in the Late Devonian. These results are discussed in the context of other HP terranes in the Bohemian Massif and wider European Variscides.

**Mots-Clés :** garnet geochronology, phase equilibria modelling, eclogite, Bohemian Massif, Variscan Orogeny

## Veining, pyrite generations, deformation stages and mineralized events at the Yaou polyphased gold deposit, French Guiana

Vincent Combes \*<sup>1</sup>, Anne-Sylvie André-Mayer <sup>1</sup>, Aurélien Eglinger <sup>1</sup>

<sup>1</sup> UMR 7359 GeoRessources – Université de Lorraine, CNRS UMR7359-CREGU – France

The Guiana shield located in South America has numerous gold mineralizations in spatial and temporal relationship with the Transamazonian orogeny (2250-1950 Ma). These gold mineralizations are spatially associated with greenstone belts along large shear zones. The Yaou gold deposit explored by the mining company Auplata is a rheologically controlled mineralized system associated with quartz-carbonate veins located mainly in intrusive bodies aligned in a 4.5 km structure striking N60° along a shear zone. Gold is itself carried by pyrite mostly as free inclusion. The observed deformation stages show a progressive evolution of the deformation going from the ductile regime to the fragile one. Phases D1 and D2 are well marked in the host lithologies. The veins associated with D1 and D2 are boudinaged and folded. A post D2 plutonic episode forms dykes and plutons of intermediate composition that are locally mylonitized by the D3 deformation. The intrusion and the mylonitisation could be synchronous. This D3 shear is mostly recorded in felsic schists (metasediments). An S3 is visible as well as a mylonitic gradient with millimeter scale pyrites with pressure shadow (porphyroclasts pre to syn D3). A fragile deformation event gives D4 quartz-carbonate veins mostly in the intrusive and more rarely cross-cutting the shear zone. D3 and D4 could form a continuum. A late brecciation D5 affects the intrusive unit. These monogenic cataclastites cross-cut the D4 veins. Two lithologies host the mineralized D4 veins; a fine grained dioritic intrusive composed of hydrothermal albite, ankerite, minor quartz, sericite and pyrite, as well as a felsic mylonitized metasedimentary unit with quartz, chlorite and sericite. The precise role of these two units is still debated, chemical trap or physical-rheological control. The surrounding area is characterized by mafic and ultra-mafic schist. By adding the observations of cores and the petrography data, it is possible to discriminate generations of vein and pyrite associated with the deformation stages. At least 3 generations of pyrites are defined. Results of *in situ* analyses using LA-ICP-MS on pyrite show at least two gold events associated with D3 and D4 confirming the multiphase nature of the deposit. Py 3 exhibits an Au-As correlation with a cobalt and arsenic rhythmic zonation. Cores are interpreted as detrital and diagenetic Py 0. Gold in Py 4 is found as solid solution (0.5- 1.5 ppm) and as inclusions in association with elements such as Te, Ag and Bi.

**Mots-Clés :** orogenic gold deposit, pyrite, deformation stages, Guiana shield

## Main features of Miocene volcanic rocks from Annaba area (northeast Algeria)

Menana Daif \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LGRN Université de Annaba Algérie – Laboratoire de Géodynamique et ressources naturelles, Université de Annaba B.P.12 ; 23000, Algérie., Algérie

Miocene volcanic rocks are part of an igneous series that outcrops in the Northeast of Algeria and that belongs to Maghreb's magmatic margin belt.

The volcanic rocks cover around 25 Km<sup>2</sup> and present a wide range of colour, texture and structure. Four facies are distinguished: andesites (stricto-sensu), dacites, discrete amounts of rhyolites and strongly rare basalts. Pyroclastic andesites are widespread and characterized by their poor sorting producing various breccias. Massive andesites are essentially composed of flow, and some pillow-lavas. In spite of this huge heterogeneity, they have a constant paragenesis: olivine is lacking, orthopyroxene is restricted to basic andesites which are less common whereas plagioclases, clinopyroxenes and hydrous minerals are abundant; titanomagnetite, ilmenite and titanite are also present in small quantities. All studied samples are from Chetaibi -Cap de Fer region.

Chemical composition indicates high SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O and low FeOT, MgO, CaO. Major element compositions show that these rocks consist dominantly of acids andesites followed by dacites, small amounts of rhyolites and strongly rare basalts. Trace elements are significantly enriched in Rb, Cs, U, Th whereas Sr and Ba are depleted. Compatible elements (Cr, Ni, Co, V, Sc) are moderate. These rocks also show enrichment in high Rare Earth Elements (REE) and depletion in heavy REE. Whole rock <sup>87</sup>Sr / <sup>86</sup>SR ratios vary from 0.707 to 0.710 testifying a complex genesis. The chemical composition of the basaltic specimen is similar to those of high alumina Basalts.

The main purpose of this contribution is to point out particular features dealing with the genesis context of these rocks.

**Mots-Clés :** petrology, geochemistry, andesites, genesis context, Annaba, Algeria.

## Devonian magmatism in the mariánské lázně complex and čistá pluton (bohemian massif) Authors : Piérig Deiller, Pavla Štípská, Marc Ulrich, Karel Schulmann, Eric Pelt, Stephen Collett, Jitka Míková

Piérig Deiller <sup>\*1</sup>, Stephen Collett <sup>\*1</sup>, Pavla Štípská <sup>\*1,2</sup>, Karel Schulmann <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Centre for Lithospheric Research, Czech Geological Survey – République tchèque

<sup>2</sup> Université de Strasbourg, ÉOST, IPGS – CNRS UMR7516 – Université de Strasbourg, ESPE – France

The Mariánské Lázně Complex (MLC) crops-out at the boundary between the lower and upper plates in the NW Bohemian Massif. Strongly retrogressed eclogite bodies in the core of the MLC show peak eclogite-facies metamorphic conditions at c. 390 Ma and are affected by HT extensional shearing at c. 375 Ma (Collett et al., 2018). To better understand the geodynamic context for this rapid transition from cold subduction to hot extension, rocks from the several tens of meters wide extensional zones have been studied. These rocks, dominated by amphibolite migmatites, contain unfoliated, phaneritic rocks in which magmatic textures are preserved. In places, the unfoliated structure of the magmatic rocks passes into magmatic foliation and locally to solid-state amphibolite-facies shear zones. The nature of these magmatic rocks ranges from amphibole gabbros to trondhjemites, the latter being previously dated giving a Devonian age (Timmermann et al., 2004). This magmatic event in the deep crust has a possible upper crustal equivalent in the granitoids of the Čistá pluton, intruding the hanging-wall Teplá-Barrandian domain (Zák et al., 2011). This study provides new whole rock geochemical data including major, trace element and Sr-Nd isotopes, combined with U-Pb zircon geochronological and Hf isotope study, for the extension-related magmatic rocks of the MLC and the supracrustal Čistá pluton. Geochemical results suppose an active continental margin origin. Zircons from the gabbro to trondhjemitic rocks of the MLC show magmatic overgrowths with ages ranging from 390 to 370 Ma and strong inheritance between 480 and 560 Ma. Zircons from the Čistá pluton show two peaks, a younger one with an age range of 350–380 Ma and an older one with a range from 380 to 410 Ma, together with a weak inheritance between 500 and 530 Ma. The results are interpreted in terms of a long-lasting magmatic activity covering most of the Devonian. Zircon in-situ Hf isotope study shows two important results. Firstly, that there was not only juvenile input to produce the Devonian magmatism, which is in accordance with the recycling recorded by the geochronology. And secondly, that the model age of the oceanic lithosphere involved in the system are not Ordovician but older, showing at least late Neoproterozoic ages. This has fundamental consequences on the architecture of the Variscan belt as the ocean involved in this segment of the orogeny can't be the Rheic Ocean as previously supposed.

**Mots-Clés :** Bohemian Massif, geochemistry, geochronology, magmatism

## Evidence of an active Devonian continental margin in the Variscan Bohemian Massif (the Mariánské Lázně Complex and Čistá pluton)

Piérig Deiller <sup>\*ψ1</sup>, Pavla Stipska <sup>2</sup>, Marc Ulrich <sup>2</sup>, Karel Schulmann <sup>3</sup>, Eric Pelt <sup>3</sup>, Stephen Collett <sup>1</sup>,  
Jitka Míková <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Center for Lithospheric Research, Czech Geological Survey, 11821, Praha 1, Czech Republic – République tchèque

<sup>2</sup> Institut de Physique de Globe, UMR 7516, Université de Strasbourg - Strasbourg – France

<sup>3</sup> Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg, EOST, CNRS, Univ. Strasbourg – France

<sup>4</sup> Czech Geological Survey, 11821, Praha 1, Czech Republic – République tchèque

The Mariánské Lázně Complex (MLC) between the lower (Saxothuringian) and upper (Teplá-Barrandian) plates contains eclogites with peak eclogite-facies conditions at ~390 Ma, affected by extensional shearing at ~375 Ma connected with granulite-facies and migmatization. To better understand the geodynamic context for this rapid transition from cold subduction to hot extension, the several tens of meters wide extensional zones have been studied. They are dominated by amphibolite migmatites and contain unfoliated, fine to coarse-grained rocks with magmatic textures including euhedral crystal shapes, magmatic bedding and/or dykes. In places, the unfoliated structure passes into magmatic foliation and to solid-state amphibolite-facies shear zones. These magmatic rocks range from amphibole gabbros to trondhjemites. A possible upper crustal equivalent of this deep magmatic event are the granitoids of the Čistá pluton, intruding the hanging-wall Teplá-Barrandian. New whole rock geochemical data including major, trace element and Sr-Nd isotopes, combined with U-Pb zircon geochronological and Hf isotope study, for the extension-related magmatic rocks of the MLC and the supracrustal Čistá pluton are provided. The calc-alkaline nature, a pronounced negative Nb-Ta anomaly, relative enrichment of fluid-mobile elements (including large ion lithophile elements, LILE), a strong fractionation of LREE over HREE and depletion of high field strength elements (HFSE) is evidence for an active continental margin. Low values of *eNd* data suggest either the presence of variable mantle chemistry at the base of the magmatic system, and/or implication of the lower crust. Zircons from the MLC gabbros to trondhjemites show magmatic overgrowths at 390–370 Ma and strong 480–560 Ma inheritance. Zircons from the Čistá pluton show peaks at 350–380 Ma and 380–410 Ma, and a weak inheritance 500–530 Ma. The results are interpreted in terms of a long-lasting magmatic activity covering most of the Devonian. Magmas intruded the lower crust during the Middle and Late Devonian and were emplaced in the upper crust during the Early Carboniferous. Magmas show strong involvement of the Cambrian lower crustal material, including the eclogites, based on variable relative enrichment of mobile elements (LREEs and LILEs) among the samples, a possible heterogeneous contribution of the subduction component into the system. Zircon in-situ Hf isotope study shows that there was not only juvenile input to produce the Devonian magmatism, which is in accordance with the recycling recorded by the geochronology. The model age of the oceanic lithosphere is not Ordovician but older, showing at least late Neoproterozoic ages. This has fundamental consequences on the architecture of the Variscan belt as the ocean involved in this segment of the orogeny can't be the Rheic Ocean as previously supposed.

**Mots-Clés :** eclogite, active margin, magmatism, deep arc, Variscan belt, zircon, zircon in, situ Hf isotope

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: pierigd88@gmail.com

## Petrography and origin of the Mn(-Pb) Tasdremt deposit (High Atlas, Morocco)

Augustin Dekoninck <sup>\*1</sup>, Gilles Ruffet <sup>2</sup>, Mohamed Magoua <sup>3</sup>, Yves Missenard <sup>4</sup>, Oriane Parizot <sup>4</sup>,  
Abdellah Mouttaqi <sup>3</sup>, Omar Saddiqi <sup>5</sup>, Johan Yans <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Namur, Département de Géologie, ILEE – Namur – Belgique

<sup>2</sup> Université de Rennes 1, Géosciences Rennes – CNRS UMR 6118 – France

<sup>3</sup> Office National des Mines et des Hydrocarbures, Rabat (ONHYM) – Maroc

<sup>4</sup> Université Paris Sud XI, Orsay (GEOPS) – 8148 – France

<sup>5</sup> Université Hassan II, Géosciences, Casablanca – Maroc

The Tasdremt manganese deposit is located in the southern foreland of the High Atlas at 70 km to the E of Taroudant, and 90 km to the SW of the Imini manganese district. The manganese ores are located in the Cretaceous strata of Tasdremt [W] and Aoufour [E]. The Cretaceous sedimentation is a succession of i) a 0-30 m thick detritic serie (red clays, sandstones and conglomerates, infra-Cenomanian), ii) a 0-20 m thick dolostone Cenomanian-Turonian in age, and iii) a Senonian detritic succession (20-50 m thick) composed of dolomitized sandstones and conglomerates interbedded with sandy dolostones. The Cenomanian-Turonian dolostone is subdivided into a yellow/gray dolostone at the base, which is covered by ii) a pinkish/white fossiliferous dolostone, the top being brecciated in contact with the Senonian conglomerates. The variable thickness of the whole Cretaceous serie is attributed to paleotopographic hights of the Cambrian dolostones. These rocks were deformed during a post-Cretaceous tectonic phase, probably the Late Eocene Atlasic one, inducing thick-skin thrusting of Cambrian dolostones over meso-cenozoic series. The present study shows that the stratigraphic position and the lateral extension of the manganese levels are quite variable along the district. The main orebeds are exposed at the top of the yellow and fossiliferous dolostone, while other manganese occurrences are located at the top of the infra-Cenomanian sandstones, at the base of the Senonian conglomerates and dolostones. X-ray diffraction points out that the ore is composed of hollandite group minerals  $[(K,Ba,Pb)Mn_8O_{16}]$ , with only small amounts of lithiophorite. Pyrolusite is nearly absent. Petrographic observations indicate that hollandite group minerals replace dolomite crystals, and fill open cavities in the dissolved dolostone, while brecciated fragments of the Mn-ore, dolomite and quartz at the top of the fossiliferous dolostone are cemented by a late calcite. This breccia is then covered by the Senonian conglomerates. This suggests that the mineralization postdates the dolomitization of the host dolostone, but predates the deposition of the Senonian sediments. This could be linked to the post-Turonian karstification period. However, the occurrence of mineralized Senonian sandstones and dolostones, as well as Mn-ore cemented by colloform hol- landite group minerals or Mn-ore in tectonic joints may indicate a second mineralization stage, postdating the Cretaceous sedimentation.

**Mots-Clés :** manganese deposit, Tasdremt, Imin, weathering, Morocco

## Fluid characterization from different types of epithermal ore deposits in the Puna plateau, NW Argentina

Louis Desanois <sup>\*1,2</sup>, Volker Lüders <sup>2</sup>, Rolf L Romer <sup>2</sup>, Samuel Niedermann <sup>2</sup>, Robert Trumbull <sup>2</sup>,  
Pablo J. Caffe <sup>3</sup>, Valeria Simon <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institute of Earth and Environmental Science [Potsdam] – Allemagne

<sup>2</sup> German Research Centre for Geosciences - Helmholtz-Centre Potsdam (GFZ) – Allemagne

<sup>3</sup> Instituto de Ecorregiones Andinas, Universidad de Jujuy, Argentina (INECOA) – Argentine

<sup>4</sup> Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional, Universidad de Salta, Argentina (INENCO) – Argentine

Two different types of epithermal ore deposits in the Puna plateau, NW Argentina have been studied in the frame of the joint German – Argentinian research project StRATEgy.

The Pirquitas Sn-Ag-(Zn) deposit, located close to the Bolivian border, is considered to be an analogue to the Miocene polymetallic epithermal Sn-Ag deposits of the southern Bolivian Tin Belt. Fluid inclusions in quartz and ore minerals were studied using transmitted and near-infrared light microthermometry. Additionally, noble gas isotope analyses of fluids released from ore-mineral separates by crushing were performed and Pb and S isotopes were analyzed in ore- mineral separates to determinate the origin of sulfur and metals. All studied minerals host only two-phase aqueous inclusions, indicating that the ore-forming fluids did not undergo phase separation (boiling). Mineralization occurred during two events (event I with 213-370 °C Th and 0-10.6 wt% NaCl equiv and event II with 190-252 °C Th and 0.9-4.3 wt% NaCl equiv). Noble gas analyses, d34S values, and Pb-isotope results require a significant contribution of magmatic fluids to Pirquitas mineralization although no intrusive rocks are exposed in the mine area. The noble gas isotope data also give compelling evidence that metal-rich magmatic fluids mixed with considerable amounts of meteoric water.

The Lindero Au-(Cu) deposit is located in the volcanic arc near the Chilean border at the southern margin of the Salar de Arizaro basin. It consists of a Miocene igneous complex composed of 6 concentric, multiphase porphyry intrusions intruded in Tertiary sandstone. The ore-bearing fluids associated with different porphyry intrusions were studied using fluid inclusion microthermometry, Raman spectroscopy and LA-ICP-MS chemical analysis. Different types of inclusion are associated to the various mineralization events: low density vapor, two-phase liquid-vapor, simple brine, polyphase, salt melt (ultra-saline) and high-density vapor. They are similar to those observed in other Ag-(Cu) deposits such as Bajo del Alumbra in Northwestern Argentina or Cerro de Pasco in Peru that show temperatures and salinity from low (

**Mots-Clés :** Bolivian tin belt, Pirquitas, Puna, Lindero, Epithermal, Fluid inclusion, Silver, Tin, Gold

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: louis.desanois@gmail.com

## Geology and rare earth elements geochemistry of ore-related hydrothermal Ca-Fe-Mg carbonates from Imiter Ag-Hg deposit, Anti-Atlas, Morocco

Mamadoudjan Diallo <sup>\*ψ1</sup>, Mohammed Bouabdellah <sup>1</sup>, Johan Yans <sup>2</sup>, Andreas Klügel <sup>3</sup>, Mohamed Mouhagir <sup>4</sup>, Abdelaziz Gaouzi <sup>4</sup>

<sup>1</sup>Département de Géologie - Université Mohammed Premier - Oujda - Maroc

<sup>2</sup>Département de Géologie - Université de Namur - Namur - Belgique

<sup>3</sup>Department of Geosciences, University of Bremen - Bremen, Allemagne

<sup>4</sup>ManagemGroup, BP 5199, 20100 Casablanca - Maroc

The world-class Imiter Ag-Hg vein deposit (32°43' N Lat; 5°36' W Long) in the Anti-Atlas Mountains of southern Morocco consists of an array of ENE-WSW- to E-W-trending, variously dipping, transpressive to transtensional veins grouped into four main orebodies referred to as Imiter 1, Imiter 2, Imiter Sud, and Igoudrane orebodies. Average silver grades range from 300 to 1,000 g/t and locally can reach 5,000 g/t. Host rocks consist of a strongly folded Cryogenian succession of greenschist-facies greywacke and organic-rich black shale, locally intruded by ca. 570–580 Ma granodioritic to dioritic intrusions. Silver mineralization occurs within the Cryogenian black shale and partly into the Ediacaran conglomerate, along the Late Neoproterozoic, N60–90 E-trending transcrustal Imiter fault zone. Two main mineralizing events referred to as epithermal-quartz and epithermal-carbonate stages are recognized. The ore mineralogy is predominantly base-metal and Ag-bearing sulphides and sulphosalts, intergrown with quartz and Ca-Fe-Mg carbonates (predominantly Fe-rich dolomite and calcite). LA-ICP-MS analyzes indicate that the Fe-rich dolomite and calcite separates are characterized by high total REY contents ranging from 268 to 809 ppm, and light rare earth elements enrichment. Moreover, chondrite-normalized REY data display broadly inclined patterns that are enriched in light rare earth elements relative to middle and heavy rare earth elements. Overall, the patterns show variable pronounced negative Eu anomalies, little or no Y anomalies, and no Ce anomalies. Nevertheless, broad similarity among the REY patterns of the Imiter ore-related Ca-Fe-Mg carbonates suggests that the parental fluids had broadly similar compositions. Calculated Y/Ho ratios, lower than 40 (27–34), are consistent with chondritic values (Y/Ho = 24–34) but are incompatible with entrainment of seawater into the hydrothermal system as proposed by previous authors. Moreover, elevated REY contents of ore-related hydrothermal Ca-Fe-Mg carbonates, from the main vein-filling stages, suggest that the ore-forming fluids interacted with graphite-rich black shale deep in the crust or with spatially associated Neoproterozoic granitoids. Further isotope geochemistry work (i.e., C and O isotopes) is however needed to constrain the origin of the ore-forming fluids involved in the precipitation of the Ag-Hg ores.

**Mots-Clés :** rare earth elements, Imiter AgHg deposit, hydrothermal CaFeMg carbonates, Morocco

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: m.diallo@ump.ac.ma

## Apport de la pétrochronologie sur l'évolution polycyclique des roches métamorphiques de l'unité de Beni Bousera (Rif interne)

Asmae El Bakili <sup>\*1,2</sup>, Valérie Bosse <sup>3</sup>, Michel Corsini <sup>2</sup>, Christian Nicollet <sup>3</sup>, Jean Marc Lardeaux <sup>2,4</sup>,  
Ahmed Chalouan <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculté des sciences Rabat - Université Mohammed V - Rabat. - Maroc

<sup>2</sup> Geoazur - Université Côte d'Azur(UCA), UMR7329 - Sophia Antipolis - France

<sup>3</sup> Laboratoire Magmas et Volcans - Univ. Clermont Auvergne, Campus universitaire des Cezeaux - Aubière - France

<sup>4</sup> Centre for Lithospheric Research - Czech Geological Survey- Klárov 3, 118 21 Prague 1 – République tchèque

La précision des chemins P-T-t enregistrés dans les roches métamorphiques ayant subi une évolution polycyclique est un exercice difficile qui nécessite une étude géochronologique combinée à une étude pétrologique détaillée. Dans le Rif interne, les roches métamorphiques des Sebtides inférieures de l'unité de Beni Bousera ont connu une histoire polyphasée complexe, marquée par un premier épisode métamorphique dans le faciès des granulites de haute pression, suivi par un métamorphisme de haute température et de basse pression. Afin de contraindre avec précision la chronologie et le contexte géodynamique de ces événements métamorphiques, des datations U-Th-Pb par LA-ICP-MS ont été effectuées en lame mince dans les métapélites granulitiques de l'unité de Beni Bousera et couplées à une étude pétrologique détaillée (pétrographie, géochimie, Raman, modélisation P-T). Les relations texturales mises en évidence entre les monazites datées et les assemblages minéralogiques montrent que les granulites ont enregistré deux évènements métamorphiques majeurs. Des âges U-Th-Pb concordants compris entre  $278 \pm 5$  Ma et  $285 \pm 3$  Ma sont fournis par les monazites en inclusion dans les grenats, en association avec un assemblage caractéristique du faciès granulitique de HP. Dans cette même unité métamorphique, les monazites matricielles donnent des âges à environ 22 Ma associés à un épisode métamorphique de HT-BP. Dans l'unité de Filali seuls des âges alpins compris entre 21 et 28 Ma ont été obtenus. Nous attribuons l'évènement métamorphique granulitique de HP d'âge Permien à un épaississement crustal lié à une collision continentale varisque. Le métamorphisme de HT-BP, enregistré dans l'ensemble des Sebtides inférieures, est interprété comme un métamorphisme d'arc lié à une subduction d'âge Oligo-Miocène.

**Mots-Clés :** U/Th/Pb sur Monazite, métamorphisme polycyclique, Beni Bousera, Rif interne.

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: asmae.elbakili@geoazur.unice.fr

## 3D modelling of synthetic basalts: olivine crystals reconstruction and results comparisons

Maxime Forsoni <sup>1</sup>, Maëlys Privat <sup>1</sup>, Eugénie Monnier <sup>1</sup>, Morgane Flament <sup>1</sup>, Elsa Ottavi-Pupier <sup>1,2</sup>,  
Julien Duquennoy <sup>1</sup>, Masayuku Uesugi <sup>3</sup>, Michihiko Nakamura <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institut UniLaSalle Beauvais (GéoLab) – Institut Polytechnique UniLasalle – France

<sup>2</sup> Bassins Réservoirs Ressources (B2R) – Institut Polytechnique UniLasalle – France

<sup>3</sup> Spring-8 (JASRI/SPRING-8) – Japon

<sup>4</sup> Tohoku University (Dept. of Earth Science) – Japon

Experimental samples of basaltic composition were created in laboratory from oxides powders at different temperature (Pupier et al., 2008), where in-situ observations on plagioclase and olivine crystals were launched by using micro-tomography beam lines at spring-8 (Pupier et al., 2013). Therefore, grayscale images were obtained for each sample and allow us to characterize the 3D crystal size distribution (CSD) as well as the crystallinity and connectivity for the olivine crystals. The CSD law expresses the number of crystals per size interval per units of volume, whereas the crystallinity and connectivity aim to measure the percentage of crystals per unit of volume and crystals in connection inside a magmatic system. All those quantitative methods enable us to get a better understanding of the crystallisation process by connecting size, distribution and abundance of crystals within a magmatic rock to its thermal history.

For this purpose, new 3D modelling methods applied to olivine crystals were developed by using the 3DEXPERIENCE ® platform (Dassault Systèmes ®) and BLOB3D software. For both of them, the modelling reconstruction is carried out by working on the successive tomographic samples images in order to observe all the crystals and to consider how they are spatially shaped. The 3DEXPERIENCE ® modelling has been conducted manually by drawing the crystals sections successively and linked them together in order to build a 3D model. However, the BLOB3D software provides an automatic treatment by applying filters which allow pointing out olivine crystals grayscales and directly link them in 3D. As a result, a set of size measurement on axes of each olivine modelled associated with volume values was determined for two synthetic basalts cooled at different temperature. Once finished, the olivine 3D CSD for the major axis and the minor axis combined with crystallinity and connectivity values were calculated at different temperature. Results obtained with the 3D methods are compared between each software to evaluate their accuracy but also between the two synthetic samples gathering different temperature of formation (1130°C and 1110°C). Hence, 3D results obtained from the different software method are close and complementary: all the CSD curves present decreasing pattern and similar connectivity/crystallinity percentage. Concerning the sample comparisons, results are different which highlight a distinct crystallisation dynamic but consistent regarding their temperature of formation.

**Mots-Cles :** 3d modelling, crystals, synthetic basalt, olivine, 3dexperience ® , blob3d, shapes, crystallinity, connectivity, csd, comparisons.

## The Montbelleux intrusion-related Sn-W ore deposit: a witness of an underestimated Cambrian metallogenic event in the Armorican massif (France)?

Eric Gloaguen <sup>\*1</sup>, Camie Mathey <sup>2</sup>, Johann Tuduri <sup>2</sup>, Yannick Branquet <sup>1,3</sup>, Marc Poujol <sup>3</sup>,  
Philippe Boulvais <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Univ. Orléans, CNRS, BRGM, ISTO, UMR 7327 (ISTO) – Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

<sup>2</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – BRGM – France

<sup>3</sup> Univ. Rennes 1 - Géosciences Rennes - OSU Rennes - CNRS : UMR6118 – France

Despite significant outcropping surfaces and favourable geology, pre-Variscan ore deposits remain scarce in France. This is particularly true in the north of the Armorican massif where the Neoproterozoic Cadomian orogeny is well preserved. There, the largest Cadomian terrane, the Fougères unit, is composed of turbiditic sediments affected by a low-grade metamorphism and intruded by granitoids. These metasediments are strongly folded presenting a steeply axial-plane cleavage and both bedding and cleavage strike N40°E. This deformation event is constrained at ca. 560-540 Ma (Ballèvre et al., 2001). Post-dating the folding, granodioritic plutons intrude sediments generating large contact metamorphism aureoles. Intrusions consists of large peraluminous Crd-Bt-granodiorite plutons emplaced at ca 540 Ma as well as scarce and small younger Bt-Ms-leucogranites. Finally, the Fougères unit is affect by a Cambrian extensional event marked by a local NE-SW-trending rifting, associated ash-flow Caldeiras and felsic volcanism (Le Gall, 1995). Close to the town of Fougères, several small Crd-Bt-granites and Bt-Ms-granites intrude the Fougères unit. Numerous occurrences of wolframite and cassiterite are spatially associated with these granites but only one W-Sn ore deposit has been found. This is the Montbelleux W-Sn ore deposit, constituted by at least 2 small and elongated Bt-Ms-granitic sills extended by 5 main quartz lodes (Chauris et al., 1989). The mineralisation, 17000 t Sn+WO<sub>3</sub> of measured resources, is hosted by a quartz veins stockwork within the granite and quartz lodes within metasediments. Zircons from the Montbelleux sills have been dated by LA-ICP-MS and provide an age of 538.2 ± 6.1 Ma. Hydrothermal apatite associated with the ore stage, provide an U/Pb age of 524 ± 13 Ma, undistinguishable within error from the age of the sill intrusions. Whole-rock geochemical results show that the Montbelleux deposit belong to ore-bearing peraluminous granites (Nb/Ta).

- Ballèvre et al. (2001). Tectonophysics, 331: 19-43  
 Chauris et al. (1989). Chron. rech. min., 496: 25-39  
 Le Gall (1995). CRAS, 321(IIa): 95-102  
 Ballouard et al. (2016). Geology, 44 (3): 231-234.

**Mots-Clés :** Panafrican ore deposit, granite, related Sn, W, Cambrian volcanism, Armorican massif, France

## Arguments pétrologiques et chronologiques en faveur d'une subduction d'âge Oligo-Miocène dans le Rif interne (Nord du Maroc)

Emmanuelle Homonnay <sup>\*ψ1</sup>, Michel Corsini <sup>1</sup>, Jean-Marc Lardeaux <sup>1</sup>, Delphine Bosch <sup>2</sup>, Adrien Romagny <sup>3</sup>, Philippe Munch <sup>2</sup>, Olivier Bruguier <sup>2</sup>, Mohamed Ouazzani-Touhami <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Géoazur - Université Nice Sophia Antipolis, INSU, Observatoire de la Côte d'Azur, IRD, CNRS : UMR7329 – France

<sup>2</sup> Géosciences Montpellier – CNRS : UMR5243, Univ. Montpellier II – Montpellier - France

<sup>3</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans - UMR7327 (ISTO) – Université d'Orléans : UMR7327 – France

<sup>4</sup> Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, Tétouan, Maroc – Maroc

La formation de la chaîne Bético-Rifaine est considérée aujourd'hui comme le résultat d'une subduction alpine, responsable de l'ouverture arrière-arc du bassin d'Alboran. Toutefois, jusqu'à présent, dans le Rif, le seul témoin de cette subduction est le métamorphisme HP-BT décrit à l'ouest de la presqu'île de Ceuta dans les unités de Frédérico des Sebtides supérieures.

Dans les unités internes du Rif (région de Ceuta et de Cabo Negro) nous montrons l'existence:

1- d'une continuité structurale entre les unités des Ghomarides et des Sebtides inférieures, qui ont subi la même évolution tectonique, marquée par des plis isoclinaux associés à une schistosité principale subhorizontale qui porte une linéation d'étirement et minérale globalement orientée N-S.  
2- d'un métamorphisme prograde d'Ouest en Est dans les Sebtides inférieures de la région de Cabo Negro caractéristique d'un gradient de HT-BP (Type Abukuma) allant du facies des Schistes Verts jusqu'au faciès des Granulites, avec les assemblages minéralogiques à (1) muscovite et chlorite, (2) muscovite et biotite, (3) muscovite et chloritoïde, (4) biotite et sillimanite et (5) grenat et sillimanite + fusion partielle. L'andalousite syn- à post-foliale est présente dans les zones (2) et (3) ; elle est clairement anté-foliale, en association à la staurolite, dans la zone (4),  
3- d'un volcanisme de type calco-alcalin à shoshonitique intrusif dans les métapélites des Sebtides inférieures au niveau de la presqu'île de Ceuta, contemporain de la déformation principale syn-schisteuse.

À l'échelle du Rif interne, les datations U/Pb sur monazites indiquent que le magmatisme de type calco-alcalin à shoshonitique ainsi que le métamorphisme de BT-HP des Sebtides supérieures et le métamorphisme de HT-BP des Sebtides inférieures sont d'âge Oligo-Miocène.

Dans ce contexte, les domaines à HP/BT et HT/BP représentent un système de type "metamorphic paired belt" et les unités des Ghomarides et des Sebtides inférieures peuvent être considérées comme une portion de croûte continentale appartenant à la plaque supérieure chevauchante alors que les unités des Sebtides supérieures appartiennent à la plaque inférieure de ce système de subduction.

**Mots-Clés :** chaîne du Rif, métamorphisme, "metamorphic paired belt", pétrologie, géochronologie

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: homonnay@geoazur.unice.fr

## Contrôle structural des minéralisations aurifères dans le Birimien : cas du gîte d'Agbahou dans la région de Divo, Côte d'Ivoire

N'guessan Nestor Houssou <sup>\*1</sup>, Marc Ephrem Allialy <sup>ψ1</sup>, Jean-Luc Hervé Kouadio Fossou <sup>φ1</sup>,  
Allou Gnanzou <sup>§1</sup>

<sup>1</sup> Université Félix HOUPHOUET- BOIGNY Abidjan (UFHB) - Côte d'Ivoire

Localisé dans la partie sud-ouest de la ceinture de roches vertes d'Oumé-Fettékro, le gisement aurifère d'Agbahou est contrôlé par des facteurs structuraux. Les données de géophysique, télédétection et forages suggèrent l'existence de failles nord-est et nord-ouest. Toutefois, les failles nord-est définissent deux importantes zones de cisaillement, Zone Tectonique Agbahou et Zone Tectonique Ouest, qui contrôlent les minéralisations or. Ces structures de premier ordre sont subparallèles au grain tectonique régional orienté en général nord-est à nord-nord-est. Elles paraissent développer respectivement sur les deux bras (oriental et occidental) d'un anticinal plongeant modérément de ~25 vers le nord-est. Chaque zone de cisaillement renferme plusieurs zones de cisaillement de second ordre ou lentilles minéralisées de direction variable et de pendage 50 à 80 ou subvertical. Les failles nord-ouest correspondent par contre à des failles décrochantes et leur développement serait attribué à des tectoniques transcurrentes. Elles ont agi comme des canaux exerçant un contrôle sur la distribution des minéralisations aurifères. Le caractère ductile-cassant des zones de cisaillement a favorisé la remontée des fluides hydrothermaux et la formation de multiples veines de quartz aurifères : les veines de type IIa et les veines de type IIb correspondant respectivement aux veines de cisaillement et aux veines d'extension. Toutefois, on note également l'existence d'une minéralisation à sulfures disséminés dans les roches encaissantes. À Agbahou, la précipitation de l'or s'est produite sans doute dans une période post à tardidéformation ductile -cassante.

**Mots-Clés :** Minéralisation aurifère, Contrôle structural, Birimien, Agbahou, Côte d'Ivoire.

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: allialy@hotmail.fr

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: fossoujean@gmail.com

<sup>§</sup>Auteur correspondant: gnanzouallou@yahoo.fr

## First in situ U-Pb dating of supergene copper mineralization: case study from Atacama desert, Chile

Zia Steven Victoire Jonathan Kahou <sup>\*ψ1</sup>, Stéphanie Brichau <sup>1</sup>, Marc Poujol <sup>2</sup>, Stéphanie Duchêne <sup>1</sup>, Eduardo Campos <sup>3</sup>, Rodrigo Riquelme <sup>3</sup>, Sébastien Carretier <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – IRD, Université Paul Sabatier - Toulouse 3, Observatoire Midi-Pyrénées, CNRS : UMR5563 – France

<sup>2</sup> Univ. Rennes 1, Géosciences Rennes – Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes, CNRS UMR 6118 - France

<sup>3</sup> Depto. Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta – Chili

Direct dating of copper mineralization remains challenging, yet an important objective for both metallogenetic studies and prospecting purposes. Here, we present a first attempt of U-Pb dating of copper-rich minerals from the Mina Sur exotic deposit from the Chuquicamata copper mine (Chile).

The Mina Sur exotic copper deposit is located in northern Chile, within the Chuquicamata mining district, about 6 km south of the world class Chuquicamata porphyry copper deposit. It was discovered in 1957 from drilling in sub-alluvial channels and copper extraction began in 1969. The copper mineralization consists mainly of chrysocolla, Mn-rich chrysocolla (also known as copper-pitch or black chrysocolla), pseudomalachite bedding and atacamite emplaced mainly as cement in gravels but also filling fractures in the bedrock. Geomorphological, mineralogical and structural studies (Mortimer et al., 1977; Munchmeyer, 1996) have shown that the Mina Sur deposit is derived from the lateral migration of copper-rich solutions from the Chuquicamata porphyry deposit. The latter was formed by the 33-31 Ma old hydrothermal alteration (Ar/Ar dating of K-feldspar and sericite; Reynolds et al., 1998) of the 35-33 Ma old porphyry (U/Pb dating on zircon; Ballard et al., 2001). However, the age of the Mina Sur exotic deposit is unknown.

A suite of Mn-rich chrysocolla clasts surrounded by pseudomalachite layers have been characterized and dated by in-situ U-Th-Pb LA-ICP-MS analyses. The data obtained on pseudomalachite define a concordant date of 19.45 ± 0.21 Ma. In the Mn-rich chrysocolla clasts, the data yield concordant to sub-concordant dates between 12 and 7-6 Ma. These dates are therefore not consistent with the date obtained on the pseudomalachite layers that coat them. This could reflect either Pb loss linked to late fluids that affected specifically these clasts or an analytical bias due to the fact that there is no chrysocolla standard available for in-situ U-Pb dating. Assuming a recent lead loss, the chrysocolla data yield an intercept date of 23 ± 15 Ma, which is compatible with the younger U-Pb date obtained on the pseudomalachite.

This preliminary study demonstrates, for the first time, that supergene copper mineralization can be dated by the U-Th-Pb method. Furthermore, the age obtained on pseudomalachite indicate that Mina Sur deposition took place at ca. 20 Ma, about 10 Ma after the unroofing and hydrothermal alteration at Chuquicamata, a result that is consistent with the supergene ages already known supergene in the Atacama Desert.

**Mots-Clés :** supergene copper mineralization, Atacama desert, U/Pb in situ dating, chrysocolla, pseudomalachite

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: steven.kahou@get.omp.eu

## Deciphering fluid flow at the magmatic-hydrothermal transition: case of the W-Sn-(Cu) ore deposit of Panasqueira (Portugal)

Gaetan Launay <sup>\*1</sup>, Stanislas Sizaret <sup>2</sup>, Laurent Guillou-Frottier <sup>1</sup>, Eric Gloaguen <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) -Orléans, France

<sup>2</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO) – Université d'Orléans, CNRS : UMR7327, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - Campus Géosciences 1A, rue de la Férollerie 45071 Orléans cedex 2, France

Deciphering fluid flow is critical to fully understand the physical processes leading to the formation of hydrothermal ore deposits. In hydrothermal systems driven by magmatic intrusions, the magmatic-hydrothermal transition is a key process which defines the behavior of fluid flow and hence the localization of mineralized bodies. However, the direction and the velocity of fluid flow related to this specific transitory stage remains poorly constrained.

Here we present a coupled textural and chemical study performed on tourmaline growth bands to constrain fluid flow at the incipience of the hydrothermal system of the W-Sn-(Cu) Panasqueira deposit. This exceptional deposit consists of a dense network of flat wolframite and cassiterite-bearing quartz veins intensely developed in the vicinity of a hidden greisen cupola. The W-Sn mineralization is preceded by a tourmalinization stage, which marks the incipience of the hydrothermal system. Tourmaline occurs as metasomatic halos around veins and as selvage along the vein-wall-rocks contacts. Directions and velocities of the hydrothermal fluid flow are determined by applying an inverse method based on the statistical measurement of growth band thickness on oriented thin sections cut perpendicularly to the c-axis of tourmaline in veins and in altered halos.

Results emphasize the key role of the greisen cupola on fluid flow focusing and the role of fluid overpressure conditions during the vein opening. The velocity values highlight an efficient transport of metal in veins largely dominated by advection process ( $10^{-4}$ - $10^{-3}$  m.s<sup>-1</sup>), whereas fluid flow in the altered wall-rocks is pervasive and mainly dominated by diffusion process ( $10^{-6}$ - $10^{-5}$  m.s<sup>-1</sup>). LA-ICP-MS analyses of tourmaline growth bands used for this fluid flow reconstruction reveal that fluids coming from the cupola are enriched in Na, K, Li, Sr and Sn, thus emphasizing the contribution of magmatic fluids during the vein opening and the metasomatic alteration of the wall-rocks. More widely, this study demonstrates the critical role of granitic cupolas and apexes as emanative centers of mineralizing fluids and therefore analysis of mineral growth bands may serve as a possible pathfinder for the research of hidden granitic cupola related to mineralized ore bodies.

**Mots-Clés :** magmatic hydrothermal activity, Panasqueira, Tourmaline, Growth band, flow direction, flow velocity

## Strain localization in HP-LT shear zones and argon isotopic record

Valentin Laurent <sup>\*1</sup>, Laurent Jolivet <sup>ψ2</sup>, Stéphane Scaillet <sup>φ1</sup>, Romain Augier <sup>§1</sup>, Pierre Lanari <sup>¶3</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO) – Université d'Orléans, CNRS : UMR7327, INSU, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

<sup>2</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTEPI – UMR7193, Sorbonne Universités, UPMC Université Paris 6, CNRS - Paris – France

<sup>3</sup> University of Bern – Suisse

Exhumation mechanisms of high-pressure low-temperature (HP-LT) metamorphic rocks in subduction zones are complex and actively discussed. The study of fossilized subduction zones allows a better comprehension of these mechanisms, showing that exhumation of HP-LT rocks is mainly accommodated along crustal-scale ductile shear zones. This study aims at constraining the geometry, the kinematic and the timing of the tectonometamorphic history of the HP-LT Cycladic Blueschist Unit (CBU) cropping out in Greece. A main objective is to constrain the timing of strain localization at different scales during exhumation to better understand the mechanical behaviour of subduction zones. Three principal methods of investigation have been used, including:

i) A field structural study that allowed determining the geometry, the kinematic and the distribution of deformations in the CBU. In this study, a progressive strain localization during exhumation toward the base of the CBU and along crustal-scale shear zones has been highlighted, allowing preservation of earlier HP-LT structures and metamorphic parageneses at the top of the lithological pile.

ii) A metamorphic petrology study where garnet compositional zoning was used to retrieve the prograde, peak and retrograde metamorphic evolution of the CBU. The results suggest a multi-stage exhumation process of the CBU with (1) early syn-orogenic exhumation within the subduction channel, (2) isobaric heating at mid-crustal depths (ca. 10-12 kbar) following thermal re-equilibration of the lithosphere, and (3) exhumation and cooling related to a post-orogenic phase of extension following slab retreat.

iii)  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating used to constrain the tectonometamorphic evolution of the CBU and the timing of strain localization within kilometre- to millimetre-scale shear zones showing different degrees of retrogression. We observe an obvious correlation between the intensity of finite deformation, the degree of retrogression and youngest mica ages.

A major result of this integrated work is that the preservation of eclogite and blueschist-facies rocks does not necessarily imply fast exhumation rates. Our results instead suggest that the exhumation history of the CBU is relatively long, spanning over ca. 30 Ma. Consequently, it appears that the exhumation rate is not the main parameter controlling the degree of retrogression of HP-LT metamorphic rocks in the CBU compared to progressive strain localization during exhumation along a cold retrograde P-T evolution within the subduction channel.

**Mots-Clés :** Subduction zone, eclogite, blueschist, metamorphism,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating, strain localization

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: laurent.jolivet@upmc.fr

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: sscaille@cnrs-orleans.fr

<sup>§</sup>Auteur correspondant: romain.augier@univ-orleans.fr

## The Hämmerlein polymetallic skarn deposit: Chemical and isotopic evidences for a two phases of mineralization from two Sn sources

Marie G Lefebvre <sup>\*ψ1</sup>, Rolf L Romer <sup>1</sup>, Johannes Glodny <sup>1</sup>, Uwe Kröner <sup>2</sup>, Marco Roscher <sup>3</sup>

<sup>1</sup> German Research Centre for Geosciences - Helmholtz-Centre Potsdam (GFZ) - Allemagne

<sup>2</sup> Technische Universität Bergakademie Freiberg - Allemagne

<sup>3</sup> Saxore Bergbau GmbH - Allemagne

The Hämmerlein polymetallic skarn deposit is hosted in schists and gneisses of the western Erzgebirge. The metamorphic units reached their metamorphic peak conditions at ~340 Ma, during the Variscan orogeny. Hämmerlein is located in the vicinity of one of the most voluminous granitic body of the Erzgebirge, the Eibenstock granite, which intruded the metamorphic units at ~320 Ma. This granite is generally thought to be the source of metals for the Hämmerlein deposit. The age of the skarn is c. 340 Ma, i.e., it corresponds to the age of the regional metamorphism and is about 20 Ma older than the Eibenstock granite and its related Sn greisen. The ~340 Ma old prograde skarn minerals (garnet, amphibole, and pyroxene) contain up to 0.45 wt% Sn. This implies that tin was available in the protolith and remobilized already during the regional metamorphism. The main tin ore minerals in Hämmerlein is cassiterite that occurs in late cassiterite-chlorite-fluorite assemblages that formed after retrogression of biotite. These late assemblages show highly radiogenic Sr isotopic composition ( $87\text{Sr}/86\text{Sr} > 1.2$ ). Such Sr composition is not present in the sedimentary protoliths, but may have formed in high Rb/Sr phases after some time. For instance, biotite with  $87\text{Rb}/86\text{Sr}$  of ~1900 would need 15 Ma to obtain  $87\text{Sr}/86\text{Sr} > 1.2$ . Thus, the radiogenic Sr isotopic composition of the late cassiterite- chlorite-fluorite assemblages implies that more than 15 Ma elapsed between the formation of the skarn and its retrogression with the formation of cassiterite. Thus, the cassiterite-bearing secondary assemblages are related to a second event, most likely the Eibenstock granite intrusion. Mass balance indicates that cassiterite-bound tin cannot be derived from the alteration of primary calc-silicate minerals alone. Therefore, there must be a second addition of tin. This younger tin addition may be related to the emplacement of the Eibenstock granite that also provides tin for numerous greisen mineralizations.

**Mots-Clés :** Erzgebirge, Hämmerlein, tin, skarn, greisen, ore deposits, Eibenstock granite

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: lefebvre@gfz-potsdam.de

## From burial to exhumation: evolution of eclogitic terranes through multimethod petrochronology, Lévézou Massif, French Massif Central

Caroline Lotout <sup>\*1</sup>, Marc Poujol <sup>1</sup>, Pavel Pitra <sup>1,3</sup>, Robert Anczkiewicz <sup>4</sup>, Jean Van Den Driessche <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Rennes UMR 6118, Univ. Rennes 1, OSU Rennes, CNRS - France

<sup>3</sup> Česká geologická sluzba - République tchèque

<sup>4</sup> Institute of Geological Sciences, Polish Academy of Sciences, Research Centre in Cracow - Pologne

To unravel the evolution of metamorphic rocks, the understanding of the mineral growth through time is required. However, dating early metamorphic stages is a challenge, due to subsequent retrograde overprinting. This is particularly true for HP metamorphism that highlights the early stages of orogenesis.

A perfectly fresh eclogite and a former eclogite retrogressed under amphibolite facies from the southern French Massif Central (Lévézou massif, Variscan Belt), were investigated with a large panel of geochronometers (U-Pb on zircon, rutile and apatite, Lu-Hf and Sm-Nd on garnet) in a petrological context tightly constrained by petrographic observation, trace element analyses and phase equilibrium modelling.

Both samples recorded similar HP conditions at 18-23 kbar and 680-800°C, while the retrogressed eclogite later equilibrated at 8-9.5 kbar and ca. 620°C. In the retrogressed sample, most of the zircon grains are characterized by negative Eu anomalies and HREE enrichment, and yield an Ordovician U-Pb date of  $472.3 \pm 1.7$  Ma. This is interpreted as the emplacement age of the mafic protoliths and, in agreement with other data available for the Variscan belt, is considered to represent the extreme thinning of continental margins during a rifting event or a back-arc extension. Few zircon rims show a weaker HREE enrichment and yield a date of  $378 \pm 5.7$  Ma, interpreted as a prograde, pre-eclogitic, age. Lu-Hf garnet dating from both samples yields identical dates of  $357 \pm 13$  Ma and  $357.5 \pm 4$  Ma, that approximate the age of the high pressure metamorphic peak. Fresh and retrogressed samples respectively yield  $350.4 \pm 7.7$  Ma and  $352 \pm 20$  Ma dates for Sm-Nd garnet dating, and  $367.8 \pm 9.1$  Ma and  $354.9 \pm 9.5$  Ma for U-Pb rutile dating. Apatite grains from the retrogressed sample give a mean age of  $351.8 \pm 2.8$  Ma. All these ages are identical within error and, when combined with P-T estimations, highlight a major decompression ranging from 8.5 to 15 kbar in less than 6 My, suggesting exhumation rates in excess of 5 mm/yr up to more than 1 cm/yr. Decompression is nearly adiabatic with gradient ranging from 7.8 to  $1.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , followed by cooling rates after major decompression exceeding  $50^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ .

**Mots-Clés :** HP metamorphism dating, U, Pb zircon, rutile and apatite dating, Lu, Hf and Sm, Nd garnet dating, P, T estimates, Trace elements, Petrochronology

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: caroline.lotout@gmail.com

## Comparaison de plusieurs méthodes d'exploration géochimique pour les minéralisations à Li-Ta-Sn, W et Sb en Europe occidentale.

Jérémie Melletton <sup>\*1</sup>, Bruno Lemiere <sup>1</sup>, Virginie Derycke <sup>1</sup>, Anne-Sophie Serrand <sup>1</sup>, Eric Gloaguen <sup>1</sup>,  
Eric Fournier <sup>1</sup>, Pascal Auger <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

En Europe, l'exploration géochimique est principalement menée à partir de méthodes " classiques " de digestion totale ou quasi-totale d'échantillons de sol. Dans d'autres régions, l'utilisation des méthodes d'extraction sélectives a montré de très bons résultats, en particulier pour révéler la présence de minéralisations sous-couverture. De même, les exemples d'utilisation de la biogéochimie en Europe restent anecdotiques bien que les limites de détection actuelles et les connaissances sur les processus d'accumulation des métaux chez un grand nombre de végétaux permettent de localiser la présence d'un nombre varié de types de minéralisations et dans des contextes très différents.

Dans le cadre du projet UpDeep (financé par l'European Institute of Innovation and Technology - Raw Materials), qui vise à développer une expertise géochimique pour l'exploration de gisements profonds en Europe, une comparaison de différentes méthodes géochimiques de surface a été menée dans les environs du granite à métaux rares de Beauvoir (Li-Ta-Sn-Be) et du stock-worck à W de la Bosse, ainsi que sur des minéralisations à Sb de Vendée.

Un des principaux challenges réside dans la contamination anthropique à long terme liée aux activités minières passées ainsi qu'aux pratiques agricoles et agroforestières. En effet, celles-ci peuvent grandement affecter les anomalies géochimiques primaires, en particulier dans les horizons de sols et les plantes.

**Mots-Clés :** Géochimie, Sb, Li, Ta, Nb, Be, exploration

## Caractérisation géochimique des fluides minéralisateurs et implications métallogéniques, cas des minéralisations à Sb, Pb, Zn, As (Au) de Hammam N'bails, Guelma, Algérie)

Brahim Merdas \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Badji Mokhtar - BP12 -23000- Annaba, Algérie

Les minéralisations polymétalliques à Sb, Pb, Zn, As (Au) de la région de Hammam N'bails NE Algérie présentent un lien avec les eaux chaudes qui émergent dans le bassin d'effondrement et à mettre en relation avec un champ géothermal qui caractérise tout le Nord Est algérien. Un certain nombre d'analyses géochimiques ont été faites afin de mieux caractériser les fluides responsables de leur mise en place.

Les résultats d'analyses chimiques par absorption atomique des travertins actuels et des eaux de la source thermale de Hammam N'bails indiquent que les travertins et les eaux présentent des teneurs anomalies en plomb et zinc.

Les inclusions fluides biphasées observées dans les cristaux de Nadorite démontrent clairement qu'elle est issue de fluides chauds dont la température de piégeage est au minimum supérieure à 50°C.

L'interprétation des résultats d'analyses des salinités à partir de la méthode dite de "Crush-Leach et la projection des rapports sur un diagramme Cl/Br versus Na/Br indiquent que les fluides responsables de la mise en place de la minéralisation sont des saumures et qui ne sont pas très comparables aux fluides de type MVT, mais appartenant plutôt au domaine des fluides issues de la dissolution de la halite. Ce sont donc des fluides hyperchlorurés qui auraient percolé à travers le trias gypso salin pour lui emprunter le chlore, le sodium et le magnésium.

Les fluides responsables de la mise en place de cette minéralisation seraient des fluides mixtes (mélange de fluides profonds et fluides de bassin), il s'agit de fluides assez chauds assimilables à des saumures qui ont percolé à travers des masses évaporitiques. Le rapport isotopique du plomb de la galène du gisement de Hammam N'bails ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ) indique la participation d'un plomb magmatique d'âge miocène.

Plusieurs gîtes épithermaux d'antimoine à travers le monde sont aurifères, mais le problème qui s'est toujours posé est de localiser cet or qui est dans la majorité des cas ultramicroscopique. La découverte de l'or à Hammam N'bails ouvre de nouvelles perspectives pour la recherche de métaux précieux dans les régions où l'on a des gîtes épithermaux à (Sb, As).

**Mots-Clés :** géochimie, fluides salins, inclusions fluides, Guelma

## Analyse LA-ICP-MS des éléments traces dans les quartz magmatiques et hydrothermaux du complexe granitique de Colettes/Beauvoir (Li, Rb, Be, Cs, Nb-Ta, Sn, W, Sb ; Allier, France)

Loïs Monnier <sup>\*1</sup>, Melleton Jérémie <sup>2</sup>, Philippe Lach <sup>2</sup>, Stefano Salvi <sup>1</sup>, Laurent Bailly <sup>2</sup>, Didier Beziat <sup>1</sup>

<sup>1</sup> GET - Observatoire Midi-Pyrénées UMR 5563 – Université Paul Sabatier-Toulouse III, CNRS – Toulouse - France

<sup>2</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) – Orléans, France

La compilation de plus de 350 analyses de quartz (mesure du Li, Be, B, Na, Al, Ti, Al, Rb, Sr, Nb, Sn, Sb, Ta, W) sur les différentes unités et faciès du granite de Beauvoir et de Colettes ainsi que sur les principales paragenèses hydrothermales comme le Stockwork de la Bosse ; l’altération greisen ; l’altération alcaline ; la kaolinitisation ; les veines proximales de quartz à Nb-Ta, W, Sn ; et les veines distales de quartz et sulfures (Cu, Zn, Sb, Sn), permet de mieux appréhender le comportement des différents métaux rares dans les magmas ou les fluides. Dans les magmas, la différentiation est illustrée par l’augmentation de certaines concentrations (Li, Rb, Al, Ge) dans le quartz et la diminution du Ti (thermo-dépendant). En accord avec la littérature (Cuney et al 1992 et références associées), les quartz du stockwork de La Bosse (considéré comme étant antérieur au granite de Beauvoir) présentent une signature distincte de celui du greisen de Beauvoir. Au contraire, les veines proximales possèdent une signature indiscernable de celle des quartz du greisen, ce qui voudrait dire qu’un même fluide serait responsable de ces deux paragenèses. L’enregistrement de l’épisode de kaolinitisation est plus complexe, avec de nombreux quartz présentant des signatures variées. Enfin, la veine distale de Nades présente une signature similaire à celle des veines proximales et du greisen, alors que la veine distale de Chaillat présente quant à elle une signature plus proche du stockwork de La Bosse. La signature chimique des quartz peut donc confirmer ou infirmer un possible lien génétique entre plusieurs paragenèses, ce qui peut être un outil efficace en cas de minéralisations éloignées géographiquement, ou sans datation disponible. Aux vues des fortes corrélations entre concentration dans le quartz et concentration dans la roche hôte, le Li le Rb et le Sn des quartz magmatiques et le Sb des quartz hydrothermaux peuvent être utilisés directement comme proxy de systèmes minéralisés.

**Mots-Clés :** quartz, éléments trace, granite de Beauvoir

## Métamorphisme, déformation et circulation de fluides lors de la subduction continentale : exemple de la méta-granodiorite du Monte Mucrone (zone de Sésia-Lanzo, Italie)

Benjamin Moris-Muttoni <sup>\*ψ1</sup>, Philippe Goncalves <sup>1</sup>, Emilien Oliot <sup>2</sup>, Kevin Mahan <sup>3</sup>, Olivier Bruguier <sup>2</sup>, Trap Pierre <sup>1</sup>

<sup>1</sup> UMR 6249 - Laboratoire Chrono-environnement (UMR 6249 - Laboratoire Chrono-environnement) - Université de Franche-Comté - France

<sup>2</sup> Géosciences Montpellier (GM) - CNRS : UMR5243, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc - France

<sup>3</sup> Department of Geological Sciences [Boulder] - États-Unis

La subduction continentale constitue une anomalie de la tectonique des plaques essentiellement pour des raisons gravitaires. Toutefois, la reconnaissance d'assemblages de HP et UHP dans des roches d'affinités continentales a permis de démontrer que la subduction continentale était possible.

L'objectif de ce travail est de caractériser les transformations minéralogiques, chimiques et structurales impliquées lors de la subduction d'un fragment de croûte continentale dans les Alpes occidentales. Le Monte se situe dans la zone de Sésia et montre toutes les caractéristiques de la subduction de roches d'affinité continentale métamorphisées dans un faciès éclogitique lors de la subduction éo-alpine. Les granodiorites varisques du Monte Mucrone montrent des degrés de déformation, métamorphisme et métasomatisme très variables depuis l'échelle de l'affleurement à celle du massif. Ainsi, ces granodiorites peuvent localement préserver (1) des assemblages magmatiques métastables avec une déformation éclogitique très localisée, (2) montrer une déformation et un métamorphisme éclogitique pénétratif aboutissant à la formation d'orthogneiss et (3) être affectée par un intense métasomatisme. Pour caractériser les effets conjoints de la déformation, du métamorphisme et des interactions fluides-roches, 3 échantillons ont fait l'objet d'une étude pétro-chronologique.

L'orthogneiss éclogitique est constitué d'un assemblage à Qtz - Phg - Cpx - Zo - Ab - Gln - Grt - Rt - Ttn et les conditions P-T sont estimées à 600-625°C - 1.7 GPa. L'échantillon métasomatique montre un assemblage rétrograde avec la disparition du rutile au profit de la titanite, l'évolution de la glaucophane en actinote. Les conditions thermo-barométriques de cet événement sont estimées à 550°C - 1.15-1.25 GPa. L'échantillon déformé présente un assemblage rétrograde avec une déstabilisation du grenat en d'omphacite et la cristallisation d'épidotes et titanites dans la foliation, ceci se produit vers 500-550°C - 1.1 GPa. Les données U/Pb LA- ICPMS sur zircon ont fourni un âge magmatique commun à 300 Ma ± 2 Ma aux 3 échantillons.

Les zircons montrent des surcroissances luminescentes datées à 63.9 Ma ± 5.8 Ma, correspondant à l'âge du métamorphisme de HP éo-alpin. Ces résultats suggèrent que (1) la circulation de fluide induisant la dissolution - précipitation des zircons et (2) la déformation alpine marquée par des phases recristallisées ont eu lieu lors de l'évolution rétrograde.

**Mots-Clés :** Subduction continentale, zone de Sésia, Alpes Occidentales, éclogite, déformation, métasomatisme

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: benjamin.moris@univ-fcomte.fr

## Le gisement des terres rares de classe mondiale de la région de Gakara au Burundi, Afrique centre-orientale

Seconde Ntiharirizwa <sup>\*1,2</sup>, Philippe Boulvais <sup>\*1</sup>, Marc Poujol <sup>1</sup>, Yannick Branquet <sup>3</sup>, Cesare Morelli <sup>4</sup>, Joël Ntungwanayo <sup>4</sup>, Gilbert Midende <sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> Univ. Rennes 1 - Géosciences Rennes - OSU Rennes - CNRS : UMR6118 - France

<sup>2</sup> Université du Burundi (UB) - Burundi

<sup>3</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO) - Université d'Orléans, CNRS : UMR7327, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

<sup>4</sup> Rainbow Rare Earths - Burundi

L'économie moderne a besoin de trouver des sources stables d'éléments de terres rares (ETR) qui sont largement utilisés dans l'industrie automobile, la production d'énergies vertes et le domaine des télécommunications. La demande grandissante couplée au monopole chinois, ont motivé la réouverture et l'exploitation des anciens gisements de la région de Gakara au Burundi. Ces gisements sont situés près du lac Tanganyika, sur le flanc abrupt du graben du rift est-africain. La gîtologie et le modèle métallogénique de ces concentrations d'ETR sont très mal connus, notre travail visant à les établir dans un but d'exploration. Ces gisements et indices d'ETR consistent en un système de veines à bastnaésite et monazite principalement. Ces veines s'étendent sur plusieurs dizaines de mètres de long avec des épaisseurs variant du centimètre au décimètre. Les roches encaissantes de la minéralisation sont principalement des orthogneiss re-coupés par un réseau dense de pegmatites, l'ensemble correspondant à un socle Kibarien ( $969 \pm 8$  Ma). Les veines minéralisées recoupent toutes les roches encaissantes suivant différents contrôles structuraux que nous détaillerons. Nos âges montrent que la minéralisation est panafricaine (autour de 600 Ma) soit 400 Ma après les derniers événements de l'orogénèse kibarienne. Nous avons également établi en détail une nouvelle séquence paragénétique qui montre en particulier un remplacement de bastnaésite (fluoro-carbonate d'ETR) par la monazite (phosphate d'ETR), le minerai variant d'un pôle à bastnaésite pure à un pôle à monazite presque pure. Associés, plusieurs générations de quartz, des biotites, ainsi que des oxydes et phosphates hydratés d'ETR secondaires ont été identifiés. Couplées aux données géophysiques d'exploration, ces données structurales, texturales et minéralogiques permettent ainsi de dresser un premier modèle gîtologique des minéralisations.

**Mots-Clés :** terres rares, bastnaésite, monazite, Gakara, Burundi

## Petro-structural study of the polyphased gold mineralization at the Galat Sufar South deposit, NE Sudan: insights from diamond drill core logging

Julien Perret \*<sup>1,2</sup>, Aurélien Eglinger \*<sup>2</sup>, Julien Feneyrol <sup>1</sup>, Anne-Sylvie André-Mayer \*<sup>2</sup>, Rémi Bosc <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Arethuse Geology SARL – Arethuse Geology – France

<sup>2</sup> GeoRessources – Université de Lorraine, CNRS UMR7359-CREGU – France

The Galat Sufar South (GSS) deposit is located within the Block 14 exploration concession operated by Orca Gold Inc. It is located in the northeastern part of Sudan, 80 km south to the border with Egypt.

At the regional scale, the GSS deposit is located at the boundary between the Halfa and the Gabgaba-Gebeit terranes, within the Keraf Shear Zone (KSZ) assumed to represent the suture between the Arabian-Nubian Shield (ANS) and the Saharan Metacraton. Preliminary structural analysis on core lead to consider four deformation events at the deposit scale: (1) a first cryptic folding ductile Dx-1 event is transposed within (2) a Dx-related shear zone expressed by a steeply dipping, N140E- to N170E-striking penetrative cleavage Sx; (3) it is followed by a discrete ductile-brittle Dx+1 event expressed by rare shear bands affecting Sx and potentially quartz tension gash veins before (4) late brittle Dx+2 brecciation event. Besides, pluri-metric- to pluri-decametric-scale Fx folding strongly controls the GSS structural framework and ore shoot distribution parallel to Fx axis (318/79) as evidenced by systematic measurement of Sx orientation on oriented core. The GSS deposit is located south of the contact between a marine carbonate platform to the north and an andesitic volcanic sequence to the south. At the deposit scale, the GSS deposit is hosted by an intermediate to felsic, pervasively sericitized, locally strongly albited and silicified metavolcanoclastic unit within a weakly carbonated, chloritized meta-Andesitic sequence. Three hydrothermal events stages have been described on core:

(1) ante-Dx type I barren pyritization is expressed by disseminated pyrite (Py) and dismembered carbonate (Cb) ± quartz (Qz) ± Py veinlets. It is associated to strong chloritization of the meta-andesite and strong sericitization of the metavolcanoclastic unit;

(2) ante-to syn-Dx type II mineralization occurs as Qz+Py ± Cb deformed veinlets and veins coeval with strong to massive silicification and moderate to strong albition of the metavolcanoclastic unit;

(3) syn-Dx+2 type III mineralization is characterized by minor Py grains to fine-grained massive sulfide matrix in Qz+Cb ± tourmaline (Tur) veins expressing a strong silicification and moderate to strong carbonatation of the metavolcanoclastic unit.

Ongoing laboratory work (optical microscopy, back-scattered electron mode-scanning electron microscopy, microtextural study of the deformation, whole rock geochemistry and *in situ* geochemistry of sulfide and gangue minerals) will help to better (1) constrain the deformation events and their kinematics, (2) describe mineral parageneses and alteration patterns, (3) quantify the contribution of the distinct hydrothermal events to the Au stock displayed at the GSS deposit and (4) precise their relative timing regarding the deposit-scale deformation history.

**Mots-Clés :** Sudan, Galat Sufar South, Arabian, Nubian Shield, Keraf Shear Zone, core logging, polyphased gold mineralization

## Deceiving zircon REE patterns and U-Pb dates from migmatite-hosted eclogites (example from the Montagne Noire, France)

Pavel Pitra <sup>\*ψ1,2</sup>, Eloïse Bretagne <sup>φ1</sup>, Jean Van Den Driessche <sup>§1</sup>, Caroline Lotout <sup>1,3</sup>, Marc Poujol <sup>1</sup>, Valérie Bosse <sup>4</sup>, Nathan Cogné <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Rennes UMR 6118, Univ. Rennes 1, OSU Rennes, CNRS - France

<sup>2</sup> Česká geologická sluzba, CZ-118 21 Praha 1, Czech Republic - République tchèque

<sup>3</sup> LPG-Le Mans - CNRS : UMR6112, Université du Maine - France

<sup>4</sup> Laboratoire Magmas et Volcans - Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II - France

Zircon REE patterns are widely used to attribute specific U-Pb dates to eclogite-facies metamorphism. Eclogites hosted in sillimanite-bearing migmatites in the Montagne Noire dome (French Massif Central) reached c. 750°C, 21 kbar before significant decompression at high temperature. Zircon crystals from an eclogite sample yield three distinct clusters of dates at 360 Ma, 340 Ma and 315 Ma. Whatever their apparent ages, however, all these grains display identical REE patterns (no Eu anomaly, flat HREE), usually described as typical for eclogite-facies equilibration. This could be related to eclogite-facies zircon crystals affected by a partial to total solid-state recrystallization during the subsequent exhumation, preserving their REE signature, but responsible for a partial to complete resetting of their U-Pb system. Alternatively, zircon may have grown in distinct pulses at different stages of the P-T evolution, characterized by the presence of significant proportions of stable or metastable garnet. In the absence of other criteria, none of these dates can be unequivocally attributed to the HP event. The 315 Ma zircon dates obtained from the embedding sillimanite-bearing migmatitic rocks are interpreted as the age of the HT-LP metamorphism. This strongly suggests that this 315 Ma date obtained from the eclogite sample is related to the HT-LP overprint and cannot be attributed to the eclogite-facies metamorphism. We caution against the unequivocal use of REE patterns in zircon to determine the age of HP metamorphism in eclogites occurring in migmatitic domes. Misinterpreted young ages may lead to inferring erroneous fast exhumation rates and consequently questionable geodynamic models.

**Mots-Clés :** Eclogite, Zircon, REE patterns, LA-ICP-MS, U-Pb dating, migmatite, Montagne Noire

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: [pavel.pitra@univ-rennes1.fr](mailto:pavel.pitra@univ-rennes1.fr)

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: [eloise.bretagne@gmail.com](mailto:eloise.bretagne@gmail.com)

<sup>§</sup>Auteur correspondant: [Jean.Van-Driessche@univ-rennes1.fr](mailto:Jean.Van-Driessche@univ-rennes1.fr)

## Incomplete hydration during retrograde metamorphism: Staurolite-, kyanite-, chloritoid-bearing pseudomorphs after andalusite (Cap de Creus, E Pyrenees, Spain)

Pavel Pitra <sup>\*1,2</sup>, Francisco J. Martínez <sup>3</sup>, Jean Van Den Driessche <sup>1</sup>, Joan Reche <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Rennes UMR 6118, Univ. Rennes 1, OSU Rennes, CNRS - France

<sup>2</sup> Česká geologická sluzba, CZ-118 21 Praha 1, Czech Republic - République tchèque

<sup>3</sup> Dept. de Geología, Universitat Autónoma de Barcelona, Spain - Espagne

Metapelitic rocks from Cap de Creus (Eastern Pyrenees, Spain) have developed andalusite ± cordierite- bearing assemblages during the Variscan low-pressure high-temperature metamorphism. Andalusite crystals are commonly transformed to very fine-grained assemblages containing white micas with staurolite, kyanite and chloritoid, and/or biotite, chlorite and corundum. The hydrous character of the replacement minerals (pseudomorphing anhydrous andalusite) and the fact that transformation locally occurs along fractures, suggests that it was enhanced by fluid circulation. Using calculated phase diagrams (pseudosections), the equilibration of the main andalusite- bearing assemblage is constrained at < 4 kbar and 550-600°C. Various types of phase diagrams are combined with a detailed analysis of the crystallisation sequence of the replacement minerals, in order to investigate the conditions of formation of the staurolite+kyanite(±chloritoid)- bearing pseudomorphs. Staurolite and kyanite are commonly associated with medium-pressure, barrovian type metamorphism. However, calculated pseudosections suggest that the stability conditions of these minerals depend strongly on the amount of available H<sub>2</sub>O. Contrary to the intuitive perception, such assemblages do not imply a pressure increase with respect to the initial andalusite-bearing assemblage and may develop at PT conditions as low as 2-3 kbar, 350°C. It is argued that in the present case they are due to an incomplete, progressive hydration of the relatively dry andalusite-bearing assemblage at low pressures (< 4 kbar) and temperatures of the order of 400-450°C. It remains to be investigated whether this 'retrograde' alteration developed during the waning stages of the Variscan orogeny, or is the result of a prograde overprint during another (Pyrenean) orogenic cycle.

**Mots-Clés :** kyanite, staurolite, andalusite pseudomorph, pseudosection modelling, Pyrenees

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: pavel.pitra@univ-rennes1.fr

## A Sb-Au mineralizing peak at 360 Ma in the Variscan Belt, an insight into Central Brittany (France)

Anthony Pochon <sup>\*1</sup>, Gloaguen Eric <sup>2</sup>, Yannick Branquet <sup>2</sup>, Marc Poujol <sup>3</sup>, Gilles Ruffet <sup>3</sup>,  
Philippe Boulvais <sup>3</sup>, Charles Gumiaux <sup>2</sup>, Florence Cagnard <sup>1</sup>, Denis Gapais <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Orléans – France

<sup>2</sup> Bureau de recherches géologiques et minières / ISTO (BRGM) – Bureau de Recherches Géologiques et Minières  
(BRGM) – ISTO, UMR 7327 - Orléans - France

<sup>3</sup> Univ. Rennes 1 - Géosciences Rennes (UR1) OSU Rennes – CNRS : UMR6118 – France

Numerous Sb-Au deposits are known in the European Variscan belt and are often associated with the late Variscan hydrothermal events linked to postorogenic extension and strike-slip faults, through the whole belt. Central Brittany hosts several Sb-Au occurrences, such as the Le Semnon Sb-Au deposit or the Saint-Aubin-des-Châteaux base metal-Sb-Au occurrence. In order to provide new constraints on the Sb-Au mineralization framework of the Central Brittany, structural, geochronological and chemical analyses have been performed on the Le Semnon deposit and the Saint-Aubin-des-Châteaux occurrence. Main results show that Sb-Au trapping of these two occurrences occurred at ca. 360 Ma. This indicates an Early Carboniferous economic Sb-Au mineralizing peak in the eastern part of the Central Brittany. Moreover, a mafic magmatism is widespread in the region and can act as the plumbing system for Sb-Au mineralizing fluids, such as the dolerite dyke of the Semnon Sb-Au deposit. Absolute dating of this mafic magmatism coupled with the early character of hydrothermal alteration associated with Sb-Au mineralizing fluids strongly suggest that the emplacement of Sb-Au mineralization and mafic magmatism was coeval. It appears that the emplacement of mafic magmatism represent a major trigger for this mineralizing system at shallow depths (less than 3 km). These new data and the ca. 360 Ma massive sulfides of south Iberia emphasize that the Early Carboniferous mafic magmatism has to be taken into account for the understanding of the genesis of mineralizing systems and the redistribution of metals in the crust, at the scale of the whole Variscan belt.

**Mots-Clés :** Sb, Au mineralization, Early Carboniferous hydrothermal event, Mafic magmatism, Armorican massif

## Any news from the Icartian in the Armorican Massif in Brittany?

Marc Poujol <sup>\*ψ1</sup>, Erwan Hallot <sup>1</sup>, Aymeric Pouligac <sup>1</sup>, Baptiste Abiven <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ. Rennes 1 - Géosciences Rennes (UR1) OSU Rennes - CNRS : UMR6118 - France

The Neoproterozoic terranes throughout the circum-Atlantic (Carolina, Cadomia and Avalon) are considered as the remnants of subduction related magmatic arcs and associated basins developed off the margins of Gondwana. As they are found in very distant regions, establishing correlations between the tectono-thermal evolutions for these terranes remains a challenge. One key to unravel these correlations lies in the study of their basement components. Although limited in size and geographically distant, several localities (Tregor, Normandy and the Channel Islands of Guernsey and Sark) are known to expose fragments of this basement in the Cadomia terrane. All these Paleoproterozoic fragments have been described as belonging to the Icartian orogeny, named after the Icart Point in Guernsey where the reference outcrops have been first described. Although some of these Paleoproterozoic outcrops have been recently studied using modern geochronology (Guernsey, Normandy), little is known about the exposures found in Brittany. In order to shed some light on these basement rocks, we collected some samples from the Port-Beni beach (Tregor, Côtes d'Armor). Indeed, this outcrop is well exposed at low tide and contains Paleoproterozoic orthogneiss rafts embedded in granodiorite and crossed cut by E-W orientated doleritic dykes. This orthogneiss is characterized by the presence of large K-feldspar porphyroblasts in a mineral assemblage comprising quartz, chlorite after biotite, K-feldspar and plagioclase, amphibole, apatite, zircon and opaque minerals. In-situ U-Pb dating of the zircon unravel a complex history for this gneiss with core yielding a date of  $2019 \pm 6$  Ma interpreted as the age of the granitic protolith surrounded by metamorphic rims at  $641 \pm 4$  Ma interpreted as the age of the metamorphism responsible for the orthogneissification. Zircon from the host granodiorite yields an age of  $600 \pm 3$  Ma identical within error with a second generation of overgrowth on the gneiss zircon at  $603 \pm 3$  Ma and with the metamorphic age of  $604 \pm 3$  Ma obtained on apatite grains from the orthogneiss. Last, the dolerite apatite U-Pb dating returns a date of  $599 \pm 6$  Ma interpreted as the emplacement age for these E-W doleritic dykes. The Paleoproterozoic age is therefore slightly younger than the most recent ages proposed for the Icartian in Guernsey and Normandy. These data also evidence for the first time the Neoproterozoic age of the Tregor doleritic dyke swarm.

**Mots-Clés :** Icartian, Cadomian, U/Pb dating, zircon, apatite

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: marc.poujol@univ-rennes1.fr

## Petrological and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological study of the Atbashi high-pressure units (Kyrgyz CAOB, Tien Shan) and inferences for continental subduction-exhumation following the Turkestan Ocean closure

Yann Rolland <sup>\*ψ1,2</sup>, Chloé Loury <sup>1</sup>, Stéphane Guillot <sup>3</sup>, Pierre Lanari <sup>4</sup>, Raphael Melis <sup>1</sup>,  
Clément Ganino <sup>1</sup>, Anthony Jourdon <sup>1</sup>, Carole Petit <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géoazur (GEOAZUR) - Université Nice Sophia Antipolis (UNS), INSU, Observatoire de la Côte d'Azur, IRD,  
CNRS : UMR7329 – Valbonne - France

<sup>2</sup> EDYTEM – Université de Savoie – France

<sup>3</sup> Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) – Université Joseph Fourier - Grenoble 1, IFSTAR, INSU, IRD : UR219,  
PRES Univ. Grenoble, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS : UMR5275, Univ. Grenoble Alpes – France

<sup>4</sup> Institute of Geological Sciences [Bern] – Suisse

The South Tien Shan belt results from the last collision event in the western Central Asian Orogenic Belt (CAOB). Understanding its formation is of prime importance in the general framework of the CAOB. The Atbashi Range preserves high-pressure rocks along the South Tien Shan suture. We identified several HP units:(i) a high-pressure tectonic mélange including boudins of mafic eclogites in a sedimentary matrix, (ii) a large ( $> 100$  km long) high-pressure Metasedimentary Unit (HPMU) and (iii) a lower blueschist facies accretionary prism. Raman Spectroscopy on Carbonaceous Material combined with phengite and chlorite multi-equilibria and isochemical phase diagram modelling indicates that the HPMU recorded homogeneous Pressure-Temperature (P-T) conditions of 23-25 kbar and 560-570°C along the whole unit.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating on phen-gites from the HPMU ranges between 328 and 319 Ma at regional scale. These ages are interpreted as (re-) crystallization ages of phengites during Tmax conditions at a pressure range of 25 to 20 kbar. Thermobarometry on samples from the high-pressure tectonic mélange provides similar metamorphic peak conditions. Thermobarometry on the blueschist to lower greenschist facies accretionary prism indicates that it underwent P-T conditions of 5-6 kbar and 290-340° C, highlighting a 17-20 kbar pressure gap between the HPMU-tectonic mélange units and the accretionary prism. Comparison with available geochronological data suggests a very short time span between the prograde path (340 Ma), HP metamorphic peak (330 Ma), the Tmax (328-319 Ma) and the final exhumation of the HPMU (295–303 Ma). Extrusion of the HPMU, accommodated by a basal thrust and an upper detachment, was driven by buoyant forces from 70-75 km up to 60 km depth, which directly followed continental subduction and detachment of the HPMU. Lithological homogeneity of the HPMU and its continental-derived character from the North Tien Shan suggest this unit corresponds to the hyper-extended continental margin of the Kazakh continent, subducted southward below the north continental active margin of the Tarim craton. Integration of the available geological data allows us to propose a general geodynamic scenario for Tien Shan during the Carboniferous with a combination of (1) N-dipping subduction below the Kazakh margin of Middle Tien Shan until 390-340 Ma, and (2) S-dipping subduction of remaining Turkestan marginal basins between 340 and 320 Ma.

**Mots-Clés :** Metamorphic petrology, Central Asia, Ar, Ar dating

## Caractérisation des brannérites naturelles ( $UTi_2O_6$ ) : une étude texturale, géochimique et cristallographique. Implications pour la connaissance des gisements d'U et les processus de remobilisation d'U

Marion Turuani <sup>\*ψ1</sup>, Flavien Choulet <sup>1</sup>, Philippe Goncalves <sup>1</sup>, Aurélien Eglinger <sup>2</sup>, Julien Mercadier <sup>2</sup>, Maurice Pagel <sup>3</sup>, Etienne Deloule <sup>4</sup>, Anne-Magali Seydoux-Guillaume <sup>5</sup>, Daniel Beaufort <sup>6</sup>, Yann Batonneau

<sup>1</sup> UMR 6249 - Laboratoire Chrono-environnement – Université de Franche-Comté, CNRS : UMR6249 – France

<sup>2</sup> UMR 7359 GeoRessources – Université de Lorraine, CNRS UMR7359-CREGU – France

<sup>3</sup> Université Paris Sud – Université Paris XI - Paris Sud - Orsay, France

<sup>4</sup> Centre de recherches petrographiques et géochimiques – CNRS : UPR2300, INSU – Vandoeuvre-Les- Nancy - France

<sup>5</sup> Laboratoire magmas et volcans (LMV) – UMR 6524 – France

<sup>6</sup> Institut de Chimie des milieux et Matériaux de Poitiers (IC2MP) – Université de Poitiers, CNRS : UMR7285

Actuellement, l'uranium est essentiellement exploité à partir de minerais d'uraninite ( $UO_2$ ). L'épuisement programmé de cette ressource requiert l'exploitation de nouvelles phases minérales non conventionnelles. La brannérite, de formule idéale  $UTi_2O_6$ , souvent reportée (U, Ca, Th, REE, Y)(Ti, Al, Fe, Si)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>-8(OH)x représente un potentiel minerais d'U, alternatif à l'uraninite. Les conditions de formation de cette phase étant mal connues, une étude comparative de 14 échantillons naturels provenant de différents contextes géologiques (hydrothermal, métamorphique et magmatique) a été réalisée. L'analyse microscopique a révélé une importante variété de texture (zonation concentrique, inclusions, stockwerk, couronnes d'altération). Les analyses des éléments majeurs, mineurs, traces et des compositions isotopiques ont permis de mettre en évidence 1) des substitutions, qui peuvent être indicatrices des conditions de formation à l'échelle du gisement, 2) des spectres de Terres Rares marquant des signatures spécifiques pour chaque contexte de formation et 3) une homogénéité isotopique permettant l'utilisation de la brannérite comme géochronomètre. Certaines substitutions nécessitent une compensation de charge (e.g.  $Ca^{2+}$ ) ce qui implique différentes spéciations de l'uranium au sein de ce minéral. Peu d'échantillons montrent une stoechiométrie proche du pôle théorique. Les occurrences hydrothermales et métamorphiques présentent des zones très altérées, avec la cristallisation de phases secondaires (e.g. coffinite  $USiO_4$ ) témoignant d'interactions fluide-minéral. Le caractère radioactif de l'uranium pose la question de l'effet de la métamictisation et du temps sur la mobilité des éléments et la conservation de la chimie primaire. Une étude cristallographique par spectroscopie  $\mu$ Raman a mis en évidence le caractère totalement amorphe des plus jeunes cristaux (4,8 Ma) mais également la formation de nanostructures d'anatase ( $TiO_2$ ) au sein du réseau cristallin dans les échantillons les plus vieux (530 Ma). Ces résultats, couplés à des observations au MET qui montrent des exsolutions d'uraninite et de galène dans les échantillons les plus âgés, semblent indiquer une relative mobilité des éléments au cours du temps. Les résultats obtenus durant cette étude permettent de discuter de plusieurs implications en terme 1) de signature et de connaissance des gisements d'U, 2) d'utilisation de la brannérite en tant que géochronomètre et 3) d'optimisation des procédés d'extraction d'U.

**Mots-Clés :** Uranium, Brannerite, Géochimie, Cristallographie, Altération, Datation U, Pb



## In-situ K-Ar dating of micas: application to the shortening and exhumation sequence of the Pyrenean axial zone

Maxime Waldner <sup>\*1</sup>, Stéphane Scaillet <sup>2</sup>, Nicolas Bellahsen <sup>1</sup>, Frederic Mouthereau <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTeP) – UMR7193, Sorbonne Universités, UPMC Université Paris 6, CNRS - Paris - France

<sup>2</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans - UMR7327 (ISTO) - CNRS - France

<sup>4</sup> GET - Observatoire Midi-Pyrénées UMR 5563 – Université Paul Sabatier-Toulouse III, CNRS - Toulouse - France

The Pyrenean Axial Zone was structured during both the hercynian and alpine orogeny. However, in both case, the deformation took place under lower greenschist metamorphic conditions (< 300°C). Thus, phyllosilicates, in particular white micas, are most of the time small in size, around 50 m or less. Such small sizes preclude the use of Ar/Ar methods because argon recoil would happen during irradiation. Thus, for such small crystals, we performed an in-situ K/Ar study coupled to Chlorite-Phengite thermobarometric analysis and provide here for the first time robust ages linked to P-T conditions.

Five samples were dated, with 50 to 100 spots on each sample. They are from the granite/granodiorite massif of Bielsa (western Axial Zone) located below the Gavarnie thrust. This (Bielsa) unit has been shortened in a distributed mode during the alpine orogeny. In other samples, micas appear to have formed during deformation and provide younger Jurassic ages but also a population at about 66 Ma, suggesting that such micas were either recrystallized or cooled during the earlier Pyrenean wedge formation.

This study first demonstrates the feasibility of in situ K/Ar dating of very small-sized (m) micas and illustrates the considerable potential for such an approach in the thermal-structural analysis of upper crustal rocks. It also provides quantitative T-t data that will be coupled to existing low-temperature thermochronological data (ZFT and ZHe in particular) to constrain the thermal and structural evolution of the Pyrenean wedge.

This study is part of the Orogen research project, a tripartite partnership between academy and industry (Total, BRGM, CNRS).

**Mots-Clés :** Geochronology, Pyrenees, Methodology, Shear zone

## Prograde melt percolation fingerprint in monazite and garnet from high to ultrahigh-pressure subducted felsic crust (Variscan Bohemian Massif)

Prokop Závada <sup>\*1</sup>, Pavla Stipska <sup>2,3</sup>, Karel Schulmann <sup>2,3</sup>, Pavlína Hasalová <sup>2</sup>, Martin Racek <sup>4</sup>, Andrew Kylander-Clark <sup>5</sup>, Robert Holder <sup>5</sup>, Bradley Hacker <sup>5</sup>, Petr Jerabek <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geophysics, Czech Academy of Sciences, Prague, Czech Republic – République tchèque

<sup>2</sup> Center for Lithospheric Research (CLR) – République tchèque

<sup>3</sup> Université de Strasbourg (EOST) – Université de Strasbourg, CNRS : Institut de Physique du Globe de Strasbourg – France

<sup>4</sup> Institute of Petrology and Structural Geology (IPSG) – République tchèque

<sup>5</sup> University of California (UCSB) – États-Unis

Ultrahigh-pressure (UHP) units represent slivers of deeply subducted crustal segments and mark major suture zones in the collisional systems. Rapid exhumation of the felsic UHP rocks is attributed to melting close to the peak conditions that promotes dramatic mechanical weakening and decoupling from the subducting slab. To understand the timing of melt flux through the slab during the subduction-exhumation cycle in the UHP region in Bohemian Massif (Eger-Erzgebirge), the geochemistry and age isotopic data of the monazites were collected using the LASS (Laser Ablation Split Stream). The sampled anatetic rock sequence comprises the protolith orthogneisses (485 Ma), migmatites, granofelses and granulites that locally display UHP index minerals as inclusions in the refractory minerals.

The pressure-temperature conditions for the banded orthogneiss were estimated at 9 kbar and 700 C, while granofels and granulite reveal much higher pressures of 15 kbar at 760 C, and 15-16 kbar at 775-840 C, respectively. Coesite is enclosed in the phosphorus and sodium-rich garnet cores in the UHP granulite. The granofelses display transitional textures and composition between the granulites and banded protolith orthogneisses. Granofelses represent high strain zones and reveal traces of localized porous melt flow. The melt transfer between the residual HP-UHP granulites and the migmatitic domains is supported by enrichment in uranium, thorium and caesium and REE in the migmatites and loss of these elements in the granofelses and granulites, although the major element composition and zircon ages of all these rock types remain similar. Oscillatory zoned monazite cores and the decreasing trend of the monazite/garnet REE distribution coefficients suggest crystallization of monazites from melts in equilibrium with growing garnets, compatible with prograde metamorphism. In contrast, crystallization of REE-rich monazite rims is linked to crystallization from melt-related to exhumation driven decompression and dissolution of REE-rich garnets. Corresponding ages reveal time span of about 5 million years between the peak prograde metamorphism (350 Ma) of the UHP granulites and granofelses and their incipient exhumation (345 Ma). Youngest ages of the monazite rims in the migmatites of 335 Ma thus bracket the entire duration of the metamorphism coupled with reactive porous melt flow between the source granulites and the migmatites at 15 Ma years.

**Mots-Clés :** ultrahigh, pressure metamorphism, monazite, melting, exhumation



## 8.2. Interactions fluide-roche : des météorites à la Terre

## Evolution de la shear zone d'Itajaí-Perimbó, sud du Brésil : contraintes apportées par les inclusions fluides

Fernando Althoff <sup>\*ψ1</sup>, Michel Dubois <sup>\*φ2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina (GCN - UFSC) – Brésil

<sup>2</sup> Laboratoire de Génie-Civil et géo-Environnement (LGCgE) – EA 4515 - Université d'Artois, Université de Lille,  
Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai – France

La shear zone de Itajaí-Perimbó (IPSZ) est la bordure nord de la ceinture Brasiliano/Pan- African Dom Feliciano (Sud du Brésil). Cette shear zone, orientée NE-SW, met en contact les schistes de la ceinture Dom Feliciano (groupe de Brusque) au SE, avec les roches sédimentaires du bassin d'arrière-arc d'Itajaí au NW. Le groupe de Brusque a évolué entre 900 et 540 Ma. La sédimentation du bassin d'Itajaí a eu lieu entre 600 et 560 Ma (Basei et al., 2011a, b\*). Le granite de Parapente est affecté par l'IPSZ et a subi une déformation cassante-plastique exprimée par des mylonites et phyllonites. Il s'est mis en place à 843 ± 2 Ma (Basei et al., 2008\*). L'IPSZ contient également un dépôt de plomb-zinc (gisement de Ribeirão da Prata) associé à des gneiss et granites fracturés et silicifiés (Biondi et al., 1992\*). Le gisement, daté à 530 Ma (Rocha et al., 2005\*) marque la fin de la déformation dans la région.

Les conditions pression-température (P-T) durant l'évolution de l'IPSZ ont été caractérisées par une étude des inclusions fluides dans le quartz du granite de Parapente et dans des veines pré-, syn- et post-minéralisation. Les différentes générations de quartz ont été déterminées à partir de leurs microstructures. L'ensemble des données comprend 1225 inclusions étudiées, réparties en 27 assemblages d'inclusions fluides (FIA) dans 10 échantillons.

Les températures d'homogénéisation (Th) se situent dans un intervalle de 193 à 155°C dans le quartz du granite le moins déformé; de 224 à 180°C dans le quartz d'une veine déformée concordante avec la foliation du granite; de 180 à 169°C dans le quartz d'une veine déformée qui recoupe la foliation du granite; et de 165 à 138°C dans les porphyroblastes peu déformés de la phyllonite. Les conditions P-T déterminées à partir des isochores des inclusions fluides correspondent à au moins 3 niveaux structuraux dans lesquels l'IPSZ a fonctionné, soit entre 20 et 10 km. Une telle variation de profondeur implique que l'IPSZ a fonctionné comme un chevauchement. Les conditions de formation de la phyllonite sont estimées à 350°C et 4 kbar. En ce qui concerne le gisement de Ribeirão da Prata, les Th se situent dans l'intervalle 100-180°C.

Dans l'ensemble de l'IPSZ les fluides identifiés sont aqueux de basse à moyenne salinité (1 à 10 % poids eq. NaCl) avec parfois présence d'une faible quantité de gaz (N2 et CO2) (granite de Parapente). Pour la minéralisation, la variation de salinité observée au sein des FIA du quartz associé indique probablement un processus de mélange entre des fluides profonds et des eaux de surface.

\*Références dans *Pesquisas em Geociências* 44(3): 401-416 [www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br](http://www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br)

**Mots-Clés:** shear zone d'Itajaí Perimbó, ceinture Dom Feliciano, Brésil

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: althoff@cfh.ufsc.br

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: Michel.Dubois@univ-lille.fr

## Apport de la microscopie analytique à rayons X à la caractérisation de météorites : exemple du XGT-9000

Fouad Amin <sup>\*1</sup>, Philippe Le Coustumer <sup>†2</sup>, Patrick Chapon <sup>‡3</sup>, Arnaud Gauthier <sup>§4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Minéralogie et Pétrographie - PETROLAB SAS - France

<sup>2</sup> Géoressources et Environnement - EA 4592 - Université de Bordeaux - France

<sup>3</sup> HORIBA Scientific SAS - France

<sup>4</sup> Laboratoire de Génie-Civil et géo-Environnement (LGCgE) - EA 4515 - Université d'Artois, Université de Lille,  
Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai - France

La caractérisation de la surface des matériaux, repose le plus fréquemment sur une préparation (sciage, métallisation) de ceux-ci ce qui est parfois incompatible avec certains échantillons de grande valeur, tels que certaines pièces historiques ou rares ; les météorites en sont un exemple particulier.

L'objet de ce travail est une étude prospective concernant l'utilisation du nouveau microscope analytique à rayons X développé par la société HORIBA. Par rapport à d'autres techniques de cartographie chimique de surfaces comme le Microscope Electronique à Balayage, l'intérêt du microscope analytique à rayons X est qu'il ne nécessite pas de métallisation ni de placer l'échantillon sous vide. Aucune préparation n'est donc nécessaire, et l'échantillon est intégralement préservé. Les analyses ont été réalisées grâce à un microscope optique couplé à un analyseur multi-élémentaire par fluorescence à dispersion d'énergie (XGT-9000). Le principal intérêt de cette technique est qu'elle permet d'obtenir des cartographies chimiques élémentaires sur des surfaces allant jusqu'à 30 cm x 30 cm et permet aussi d'avoir une image X en mode transmission. Deux météorites (une chondrite de type LL5 et une sidérite de type IIAB) fournies par la société PETROLAB SAS ont ainsi été analysées dans le cadre de cette étude. Les résultats obtenus sont extrêmement satisfaisants d'un point de vue métrologique. La précision des cartographiques chimiques élémentaires sur des surfaces d'échantillons de dimensions allant de 1 cm x 1 cm jusqu'à 10 cm x 10 cm, couplée à des temps d'acquisition relativement courts démontrent tout le potentiel de ce nouveau microscope pour l'observation et l'analyse de matériaux extraterrestres et terrestres de grande dimension.

**Mots-Clés:** Météorite, chondrite, sidérite, cartographie chimique élémentaire, microscope Horiba XGT 9000

Intervenant

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: plc@lnet.fr

<sup>†</sup>Auteur correspondant: patrick.chapon@horiba.com

<sup>‡</sup>Auteur correspondant: Arnaud.Gauthier@univ-lille1.fr

## Monitoring by X-Ray Tomography of the 3D evolution, and multi-technique characterization of the mineralogical changes at the interface between a Low-pH cement and Steel

Julien Bonnet <sup>\*1,2</sup>, Héloïse Verron <sup>1,2</sup>, Régine Mosser-Ruck <sup>2</sup>, Jérôme Sterpenich <sup>2</sup>,  
Christophe Morlot <sup>2</sup>, Franck Bourdelle <sup>3</sup>, Nicolas Michau <sup>1</sup>, Xavier Bourbon <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) - Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

<sup>2</sup> Laboratoire Géoressources – UMR 7349 CNRS, Université de Lorraine – France

<sup>3</sup> Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) - EA 4515 – Université d'Artois, Université de Lille, Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai – France

Several countries are investigating the deep geological disposal of high-level radioactive waste by combining natural clayey barriers, as the Callovo-Oxfordian claystone of the Paris basin in France, and engineered barriers like cementitious materials and/or carbon steel canisters. As an example, a low-pH cementitious grout is studied by Andra as a potential barrier to improve radioactive waste confinement. It is expected that this cementitious-bentonitic material neutralizes the acidity induced by the CO<sub>x</sub>, oxidized during the digging of the galleries. In particular the oxydation of the pyrite of the claystone produces H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> that leads to calcite dissolution and CO<sub>2</sub> degassing. The final consequence is the acidification of the pore water incoming in the disposal cell by both H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>. The low-pH cement can maintain a pore water pH ~ 12 so that to neutralize a potential acidity and to passivate steel canisters. But the formula of the grout is developed so that the alkali reserve is exhausted when water comes into contact with the vitrified waste. Otherwise it could be damaged by high alkaline water [1]. Experiments were carried out to investigate the interaction between a low-pH cement and the steel used in the disposal cells at 25°C and in oxidizing conditions. The 3D evolution linked with the alteration of a piece of steel covered by a low-pH cement was monitored using X-ray tomography. X-ray images recorded with time were used to quantify the volume of steel corroded over time and to estimate corrosion rates. After 12 weeks, the experimental device was cut to characterize the newly formed phases using a multi-technique approach (Raman, XRD, SEM, TEM and XRF mapping). Analyses revealed a complex mineralogical assemblage composed of Ca/Fe sulfate, Fe-oxyde and iron silicates. These results make it possible to outline the alteration mechanisms and to evaluate the first steps of the steel corrosion (rates) in a low-pH cement-steel system. [1] Ferrand et al. (2014). Procedia Materials Science, 7, 223–229.

**Mots-Clés:** high level radioactive waste, low pH cement, cementitious materials

\*Intervenant

## Distribution of Rare Earth Elements during weathering: insights from sequential extractions experiments

Axel Denys <sup>\*ψ1</sup>, Emilie Janots <sup>φ1</sup>, Anne-Line Auzende <sup>1</sup>, Martine Lanson <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) – UMR 5275 CNRS - Université Grenoble Alpes – France

The Rare Earth Elements (REE) are critical resources for their uses in numerous industrial and technological domains. Currently, REE are extracted from carbonatites/alkaline igneous rocks and ion adsorption type deposit. The latter type forms by the weathering of granitic rocks. Alteration is responsible for the mobilization, fractionation and redistribution of REE at the surface of clay minerals. This type of deposit is rare (Southern China) and petrological models are still controversial: they depend on primary bedrock geochemistry, weathering conditions and secondary mineral precipitation. In particular, the conditions favoring REE adsorption at the clay surface remain unclear. In order to understand the REE distribution, we ran geochemical sequential extractions experiments on natural samples and synthetic phases. In particular, we tried to distinguish between the REE in adsorption (clay, Mn-oxides/Fe-oxides, organic matter) from structural incorporation (accessory minerals). The natural samples were taken in three horizons (A-, B- and C-) of a lateritic profile developed on a granite from Madagascar. The mineralogy and whole-rock chemistry are already investigated, but the REE-adsorption contribution remains to be addressed. In the A- and C-horizons, REE concentrations are similar to the bedrock (around 400ppm) and Ce(III) dominates. In the oxidized B-horizon, REE concentration is similar to ion-adsorption type deposits (around 2000ppm) and Ce(IV) is the most abundant REE. Synthetic Ce-bearing phases are analogous to the major and accessory minerals found in the Madagascar profile. They were prepared in order to evaluate possible pitfalls during extractions. In all the horizons, our experiments reveal that adsorption at the clay surface (< 3.5 wt% of the REE) is negligible. In A-horizon, REE are mainly contained in REE-bearing mineral (alunite-jarosite group). In the B- and C-horizon, respectively 87wt% and 54wt% of the REE, and the Ce totality in B-horizon, are measured at the step where amorphous Fe-oxide is expected to dissolve. This result is surprising because previous observations and literature data will rather suggest that REE are normally contained in cerianite or Mn-oxide in the B-horizon, and rhabdophane in the C-horizon. At the light of our experiments on the synthetic phases and the geochemical dataset, it is shown that Mn-oxide, rhabdophane, goethite and other amorphous phases could also dissolve at this stage, whereas cerianite is not involved.

**Mots-Clés:** Rare Earth Elements, sequential extractions, adsorption, laterite, weathering

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: [axel.denys@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:axel.denys@univ-grenoble-alpes.fr)

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: [emilie.janots@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:emilie.janots@univ-grenoble-alpes.fr)

## Enregistrement des fluides minéralisateurs en W, Sn, Nb-Ta, dans les micaschistes du complexe granitique de Colettes/Beauvoir (Allier) via l'analyse des éléments traces dans les micas (LA-ICP-MS).

Loïs Monnier <sup>\*1</sup>, Stefano Salvi <sup>1</sup>, Didier Beziat <sup>1</sup>, Melleton Jérémie <sup>2</sup>, Laurent Bailly <sup>2</sup>, Philippe Lach <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – UMR 5563 CNRS OMP UPS – UMRD 234 IRD UPS - Université Paul Sabatier Toulouse III - France

<sup>2</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) – Orléans - France

L'analyse des micas de l'encaissant, des micas présents au sein des veines hydrothermales ainsi que des micas des granites, révèlent pour certaines paragenèses des teneurs inédites en W, Sn, Nb, Ta, jamais atteintes dans des environnements similaires (Li et al. 2014 ; Hulbosch et al. 2016 ; Xie et al. 2016 ; Breiter et al. 2017 ; Legros et al. 2018). Via une approche novatrice présentant le plus large set de données à notre connaissance sur un même site (156 analyses LA-ICP-MS), et utilisant diverses analyses statistiques multivariées, la signature de ces micas est utilisée pour relier leur formation aux différents épisodes minéralisateurs ayant affectés la zone à différentes périodes de l'orogenèse varisque (voir le résumé RST 2018 " *Trois épisodes minéralisateurs distincts dans l'orogenèse varisque responsables de la précipitation de trois types de wolframites aux alentours du complexe granitique de Colettes/Beauvoir (Allier) ?*" ). Ainsi, des micas de type muscovite et phengite, présents dans les micaschistes en bordure de veines à W-Sn, ont des compositions respectivement similaires à celles des micas accompagnants la wolframite du stockwork de la Bosse et à celles des micas du greisen de Beauvoir. De plus, les datations réalisées sur les inclusions minérales trouvées dans ces deux types de micas, rutile daté à  $328,4 \pm 4,5$  Ma (méthode U-Pb ; thèse en cours) dans la muscovite et monazite daté à  $308 \pm 4$  Ma (méthode U-Pb) dans la phengite, donnant respectivement des âges similaires à ceux obtenus sur la wolframite du stockwork (wolframite datée à  $333,4 \pm 2,4$  Ma en U-Pb ; Harlaux et al 2017) et à l'âge du granite de Beauvoir (granite daté à  $308 \pm 2$  Ma en Ar-Ar ; Cheilz et al 1992), renforcent ce lien génétique.

Les 2 principales conclusions de ce travail sont :

- La confirmation que les micas sont un excellent proxy pour les minéralisations en W, Sn, Nb, Ta (en accord avec Legros et al 2018);
- Chaque événement hydrothermal serait "signé" par une composition de mica particulière, via leur signature en élément trace. En effet, les micas d'un encaissant métasomatisé présentent les mêmes signatures que ceux des objets hydrothermaux du même âge (veines, greisen...). Cette approche ouvre de nouvelles perspectives pour la compréhension des minéralisations en W, Sn, Nb, et Ta les plus complexes.

**Mots-Clés:** micas, éléments, traces, fluide orthomagmatique

<sup>\*</sup>Intervenant

## Influence des contraintes tectoniques régionales sur la morphologie d'un réseau de dissolution dans une roche calcaire soumise à l'injection d'une solution enrichie en CO<sub>2</sub> dissous

Aurélien Randi <sup>\*ψ1</sup>, Vitaliy Privalov <sup>φ1</sup>, Jérôme Sterpenich <sup>1</sup>, Christophe Morlot <sup>1</sup>, Jacques Pironon <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géoressources – UMR 7349 CNRS et CREGU - Université de Lorraine – France

Cette étude s'inscrit dans le cadre des projets CO<sub>2</sub>-DISSOLVED et PILOTE CO<sub>2</sub>-DISSOLVED qui étudient un nouveau concept combinant la récupération de chaleur géothermique au stockage sous forme dissoute de CO<sub>2</sub> émis par une installation industrielle faiblement émettrice (moins de 150 000 t/an). Cette approche permet à l'émetteur industriel qui stocke son CO<sub>2</sub> de bénéficier directement et localement de la chaleur produite et ainsi compenser les coûts relatifs au stockage. Dans ce contexte, l'acidification de la saumure engendrée par la dissolution du CO<sub>2</sub> nécessite de quantifier les impacts chimiques et hydrodynamiques de son injection sur le réservoir hôte. Les phénomènes induits sont complexes et doivent être pris en compte afin de définir des scénarios potentiels d'injection permettant d'assurer un stockage de CO<sub>2</sub> sécurisé. Pour ce faire, le dispositif expérimental MIRAGES2 a été développé. Il permet de reproduire un puits d'injection à l'échelle du laboratoire en imposant une injection " radiale " d'une solution enrichie en CO<sub>2</sub> dissous dans les conditions de pression et de température attendues dans un réservoir géothermique (60 - 120 bar - 150g/h). Une série d'expériences a été réalisée sur des échantillons cylindriques de calcaire oolithique du Lavoux (Dogger du bassin de Paris) extrait en surface dans la carrière de Chauvigny située dans le département de la Vienne.

Un analyse non destructive post mortem des échantillons complets par micro-tomographie aux rayons X a mis en évidence le développement d'un réseau radial poreux anisotrope sous la forme de " wormholes " ramifiés depuis le point d'injection jusqu'à l'extérieur de la carotte. Ces résultats montrent à travers les différentes expériences menées que le réseau de dissolution s'organise selon des directions bien définies. L'analyse de la tectonique régionale à partir d'une étude topographique et géomorphologique a permis d'orienter les réseaux de dissolution observés dans nos échantillons. Ainsi, selon les régimes d'écoulement imposés, la propagation de wormholes a lieu principalement dans les fractures résultant des champs de contraintes de cisaillement dextre affectant la zone de Chauvigny où les échantillons ont été prélevés.

En conclusion, cette étude structurale régionale a permis d'établir qu'il existe une relation étroite entre la distribution des défauts structuraux engendrés par les stress régionaux et la morphologie du réseau de dissolution observée suite à nos différentes expériences.

**Mots-Clés:** sequestration CO<sub>2</sub> dissous, réseaux de dissolution, morphologie des wormholes, zone de cisaillement dextre, fractures de Riedel

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: aurelien.randi@univ-lorraine.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: vitaliy.privalov@gmail.com

## Solubilité de NO en solution aqueuse jusqu'à 600 bar déterminée par une approche couplée : microspectrométrie Raman et simulations moléculaires

Jérôme Sterpenich <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Marie-Camille Caumon <sup>1</sup>, Veronique Lachet <sup>2</sup>, Benoît Creton <sup>2</sup>, Aurélien Randi <sup>1</sup>,  
Pascal Robert <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géoressources - UMR 7349 CNRS et CREGU - Université de Lorraine - France

<sup>2</sup> Institut Français du Pétrole - Energies nouvelles (IFPEN) - France

En fonction de la source d'hydrocarbures et des procédés de captage du CO<sub>2</sub>, le gaz de combustion issu des chaudières peut être accompagné d'impuretés pouvant être co-injectées dans un stockage géologique. Ces gaz, tels que les SO<sub>x</sub>, les NO<sub>x</sub> ou l'oxygène, peuvent interagir avec les fluides du réservoir, les roches et les matériaux des puits et peuvent potentiellement affecter la sécurité du stockage. Cependant, il n'existe actuellement que peu de données sur le comportement de tels mélanges gazeux, ainsi que sur leur réactivité chimique, notamment en présence d'eau. Une raison de ce manque vient de la difficulté de manipulation en raison de leur dangerosité et de leur réactivité chimique élevée.

Le but de cette étude est de coupler spectrométrie Raman et simulations moléculaires Monte Carlo pour acquérir de nouvelles données thermodynamiques pour les systèmes NO / eau en conditions de stockage profond. Un dispositif expérimental innovant est couplé à la microspectrométrie Raman pour identifier et quantifier les espèces moléculaires des phases fluides. Des micro-capillaires de silice (diamètre interne de 100 µm) sont chargés avec du NO(g) et de l'eau. Ils sont transparents et permettent la visualisation des différentes phases, la quantification de leur volume et l'analyse de leur composition chimique par spectrométrie Raman. Ces micro-réacteurs permettent d'investiguer des températures de -83 à 773 K et des pressions allant jusqu'à 1,5 kbar. Cette méthode permet de travailler en toute sécurité avec des micro-volumes de gaz dangereux.

Une méthode quantitative pour déterminer la solubilité du NO dans l'eau est développée grâce aux simulations moléculaires (simulations Monte Carlo). Grâce à un calcul précis des interactions entre les molécules et à un échantillonnage de toutes les positions que ces molécules peuvent adopter, cette approche permet de calculer les propriétés thermophysiques du système considéré (NO / H<sub>2</sub>O). Pour valider le processus de quantification, l'approche utilisée est de i) déterminer la spéciation des espèces aqueuses, ii) vérifier la validité de la courbe d'étalonnage à basse pression (loi de Henry), iii) vérifier la linéarité entre le signal Raman et la solubilité prédictive avec des simulations moléculaires. Cette étude donnera pour la première fois la composition chimique précise du système NO / eau sous les pressions et les températures d'un stockage géologique de gaz acides.

Cette étude est en partie financée par l'ANR SIGARR et par l'Institut Carnot de Lorraine (ICEEL).

**Mots-Clés:** solubilité, NO, stockage géologique, Raman, expérimentation, haute pression

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>✉</sup>Auteur correspondant: jerome.sterpenich@univ-lorraine.fr

## Etude expérimentale des interactions Fer ou acier/ciment bentonitique/argilites en conditions de stockage de déchets radioactifs

Héloïse Verron <sup>\*2,1</sup>, Julien Bonnet <sup>1,2</sup>, Jérôme Sterpenich <sup>1</sup>, Franck Bourdelle <sup>3</sup>, Régine Mosser-Ruck <sup>1</sup>, Aurélien Randi <sup>1</sup>, Xavier Bourbon <sup>2</sup>, Nicolas Michau <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géoressources – UMR 7349 CNRS, Université de Lorraine – France

<sup>2</sup> Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) – Ministère de l’Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique – France

<sup>3</sup> Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) - EA 4515 – Université d’Artois, Université de Lille, Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai – France

La formation du Callovo-Oxfordien (COx) à l’Est du bassin de Paris, est étudiée pour le stockage des déchets radioactifs de haute activité dans le cadre du projet Cigéo (Centre industriel de stockage géologique).

La phase de creusement des galeries et des alvéoles est une étape qui impacte les conditions physico-chimiques dans lesquelles se trouve les argilites. En particulier, l’oxydation des argilites conduit à un transitoire acide de l’eau du site de stockage qui augmente les vitesses de corrosion des composants en acier faiblement allié des alvéoles de déchets vitrifiés. Pour neutraliser ce processus, l’injection d’un coulis cimento-bentonitique (appelé MREA) entre le COx oxydé et le chemisage en acier est étudié. Il est donc essentiel de comprendre son comportement au contact du COx et de l’acier dans les conditions (P, T, X) envisagées pour le stockage. Une série d’expériences a été menée afin d’étudier les interactions COx/MREA/Fer ou acier dans des conditions représentatives de celles du stockage géologique. Des mélanges composés de poudres d’argilites, de MREA, de fer ou d’acier faiblement allié en différentes proportions ont été introduits, avec une solution acide en excès (pH = 5.8), dans des autoclaves instrumentés permettant un suivi en continu de la pression de gaz, de la température et du pH. Les gaz, les solutions expérimentales et les produits solides ont été analysés. Les résultats ont été comparés avec ceux publiés sur des expériences d’interactions COx/Fer dans les mêmes conditions [1].

Le suivi de pression et l’analyse des gaz montrent que l’altération du fer et de l’acier est plus importante en début d’expérience en présence de MREA [1]. Le suivi du pH indique que le MREA joue son rôle de neutralisation vis-à-vis du transitoire acide en une dizaine de jours. La différence de réactivité observée entre l’acier et le fer, outre l’influence des éléments d’addition, pourrait s’expliquer par la différence de surface spécifique de ces deux matériaux ou encore par la nature des produits de corrossions [2]. De plus les ratios entre solides, le pH ou la disponibilité en plusieurs éléments comme le soufre, le fer, ou la silice sont autant d’hypothèses explorées pour expliquer les différents comportements observés.

Bourdelle et al. (2017) *Chem. Geol.* 466, 600-607. [2] Bourdelle et al. (2014) *Chem. Geol.* 381, 194-205.

**Mots-Clés:** Interaction fluide/roche, stockage, expérimentation, argilites

\*Intervenant

## Hydrothermalisme expérimental en conditions martiennes : La matière organique structure l'assemblage minéral

Jean-Christophe Viennet <sup>\*1</sup>, Pierre Jacquemot <sup>1</sup>, Sylvain Bernard <sup>1</sup>, Maguy Jaber <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie UMR 7590 CNRS MNHN UPMC IRD – Sorbonne Université – France

<sup>2</sup> Laboratoire d'Archéologie Moléculaire et Structurale UMR 8220 CNRS UPMC - Sorbonne Université – France

Malgré les récentes découvertes, il demeure impossible de conclure de façon certaine sur la présence de molécules organiques riches en groupements fonctionnels dans les terrains argileux anciens de la surface de Mars. Ces argiles, principalement des smectites riches en magnésium (Mg), se sont formées au cours d'épisodes d'altération hydrothermale de la croute basaltique. Bien que les futures missions Martiennes exploreront ces terrains argileux, aucune cible minérale pouvant témoigner de la présence de molécules organiques n'a jusqu'à présent été identifiée.

Nous avons mené une série d'expériences de 7 jours en conditions hydrothermales sous atmosphère Martienne primitive ou Terrestre en système fermé à 100 et 200 °C sous pression autogène, dans le but de déterminer l'influence de la présence de molécules organiques sur les phases minérales argileuses. Les résidus expérimentaux ont été caractérisés à l'aide d'outils de pointe de la minéralogie et de la géochimie organique (diffraction des rayons X et spectroscopies infrarouge, Raman, RMN et XANES).

En absence de molécules organiques, aucune transformation minéralogique n'est observée sur la phase minérale. En présence de molécules organiques telles que l'ARN, des phosphates de magnésium et d'aluminium se forment. Les molécules organiques dégradées se retrouvent, quant à elles, adsorbées sur la saponite en partie tobelitisée. Les mêmes résultats sont obtenus quelle que soit l'atmosphère du système (Martienne primitive ou Terrestre), soulignant le rôle majeur exercé par les molécules organiques sur la nature de l'assemblage minéral en contexte hydrothermal.

Outre nous aider à mieux contraindre le rôle des molécules organiques dans les interactions fluides-roches, ces résultats expérimentaux permettent d'identifier des assemblages minéralogiques qui pourraient indiquer la présence (actuelle ou passée) de molécules organiques pas forcément détectables in-situ.

**Mots-Clés:** Altération, minéraux argileux, matière organique, Mars

<sup>\*</sup>Intervenant



## 9. ARCHEOMETRIE, ARCHEOLOGIE

## Approche multi-technique en archéologie (micropaléontologie, pétrographie et minéralogie) : exemple de la reconstitution d'un gisant fragmenté du Musée de Valenciennes

Eric Armynot Du Chatelet <sup>\*ψ1</sup>, Michel Dubois <sup>2</sup>, Vincent Hadot <sup>3</sup>, Renaud Toullec <sup>4</sup>, Sandra Ventalon <sup>1</sup>,  
Philippe Recourt <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Lille - Sciences et Technologies UMR LOG 8187 - Université du Littoral Côte d'Opale, CNRS, France

<sup>2</sup> Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) - EA 4515 – Université de Lille – France

<sup>3</sup> Musée des Beaux Arts de Valenciennes – Ville de Valenciennes – France

<sup>4</sup> Institut Polytechnique LaSalle Beauvais – Institut Polytechnique LaSalle Beauvais – France

Cette étude constitue une enquête multi-paramètre pour l'investigation géoarchéologique. Elle porte sur l'analyse de deux éléments de statuaire exposés au musée de Valenciennes provenant chacun d'un gisant. Il s'agit d'une part d'une tête, et d'autre part, d'un corps, ce dernier élément étant supposé être celui de Jeanne d'Ecaussines (XIVème siècle). Le cou, lui, est manquant. Le corps provient des fouilles dans les ruines du Couvent de Notre-Dame de Beaumont à Valenciennes, l'autre a été amené au Musée hors de tout cadre de fouille.

Les similitudes du matériau (calcaire blanc-crème à glauconite), les proportions et la facture peuvent laisser supposer que les deux objets proviennent du même gisant, mais il manquait une stricte démonstration. L'objectif de l'étude est de mettre en valeur les arguments micropaléontologiques, pétrographiques et minéralogiques, en plus des caractéristiques de la facture, afin de déterminer si ils proviennent de la même statue ou non.

Pour cela, trois lames minces ont été réalisées, deux à partir d'un fragment de la tête et une sur le corps. La nature des éléments figurés (présence de glauconite, quartz) et organiques (nature des micro-fossiles) confirment les similitudes observées macroscopiquement. Dans les deux cas, l'étude sédimentologique et diagénétique indique qu'il s'agit d'une turbidite carbonatée ayant subi un enfouissement maximal de 300 mètres.

Une approche statistique originale a été développée sur les éléments figurés pour estimer la confiance que l'on peut avoir sur les similitudes microscopiques. Les caractéristiques minéralogiques et micropaléontologiques (grains de glauconite, de quartz et les foraminifères) ont été dénombrés avec précision en microscopie optique et au MEB et soumis à des tests statistiques afin de rendre compte de l'hétérogénéité initiale du matériau. En croisant tous les résultats, rien n'indique que le corps et la tête du gisant ne proviennent pas de la même statue.

En ce qui concerne l'origine de la roche, un grand foraminifère Operculina du fragment de tête indique une position stratigraphique Eocène-Oligocène. Le croisement des informations stratigraphiques et pétrographiques indique une origine non régionale de la roche, toujours en cours d'investigation.

**Mots-Clés:** gisant fragmenté, approche intégrée, pétrographie, minéralogie, micropaléontologie

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant : eric.armynot@univ-lille.fr

## Utilisation des foraminifères et des thécamœbiens pour les reconstitutions paléo-environnementales : définition des méthodes et application

Eric Armynot Du Chatelet <sup>\*ψ1</sup>, Desouter Samuel <sup>2</sup>, Fabio Francescangeli <sup>3</sup>, Mathieu Lançon <sup>2</sup>,  
Armelle Riboulleau <sup>4</sup>, Murielle Meurisse-Fort <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Université de Lille - Sciences et Technologies UMR LOG 8187 - Université du Littoral Côte d'Opale, CNRS- France

<sup>2</sup> INRAP - Institut National de Recherches Archéologiques Preventives, Institut national de recherches archéologiques préventives - France

<sup>3</sup> Université des Sciences et Technologies de Lille (UMR LOG 8187) – Université des Sciences et Technologies de Lille - Lille I - France

<sup>4</sup> UMR 8187 CNRS (LOG) - Université des Sciences et Technologies de Lille - Lille I - 59655 Villeneuve d'Ascq, France

<sup>5</sup> Conseil départemental du Pas-de-Calais, Direction de l'Archéologie, Hôtel du Département, FR-62018 ARRAS cedex 9 et UMR 8164 HALMA CNRS/Univ. Lille SHS/MCC – Université Charles de Gaulle - Lille III : UMR8164 Halma - France

Reconstituer les paléo-environnements est un objectif des études géo-archéologiques. La nature façonne l'environnement qui est ensuite modifié par l'Homme. Dans le contexte des environnements côtiers, l'objectif de l'étude est de définir un modèle statistique basé sur la microfaune de foraminifères et de thécamœbiens préservée dans le sol, puis de reconstituer les environnements de dépôts passés, façonnés par la nature et éventuellement remaniés par l'Homme.

Sur la base des données disponibles comprenant 901 stations d'échantillonnage des zones subtidales jusqu'aux marais maritimes, on analyse le schéma de répartition régionale (Manche et du Sud de la Mer du Nord) des foraminifères benthiques et des thécamœbiens. Ces travaux permettent d'assigner 37 espèces aux marais maritimes (hauts, moyens et bas), aux vasières et aux zones subtidales. Les espèces sont des indicatrices d'une seule unité environnementale (par exemple, *Elphidium gunteri* pour la vasière) jusqu'à quatre unités (par exemple, *Haynesina germanica* de l'estran jusqu'au milieu du marais maritime). Pour chaque espèce on définit 2 valeurs de probabilités, 1) la probabilité qu'un site appartienne à une unité environnementale en considérant la présence d'une espèce ; 2) la probabilité de trouver une espèce dans un site appartenant à l'une ou l'autres des unités environnementales.

Ce modèle statistique est appliqué à la reconstitution de l'environnement des dépôts sédimentaires et leur utilisation (naturelle ou anthropique) dans la proximité d'un site archéologique du Pas-de-Calais.

Les résultats de la présente étude améliorent les futures interprétations paléo-environnementales à haute résolution, basées sur les foraminifères benthiques et les thécamœbiens, dans des environnements de transition.

**Mots-Clés:** foraminifères, indicateurs écologiques, reconstitutions paléo, environnementales

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: eric.armynot@univ-lille.fr

## Cérasite ou blanc de plomb ? Comment distinguer les carbonates de plomb naturels et artificiels utilisés dans les matériaux anciens ?

Lucile Beck <sup>\*ψ</sup>

Laboratoire de Mesure du Carbone 14 (LMC14-LSCE) - CEA, CNRS : UMR8212, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR0000, Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), MCC - CEA Saclay, Bâtiment 450, porte 4E PC 42 91191 Gif sur Yvette cedex, France

Les carbonates de plomb sont utilisés depuis l'Antiquité comme cosmétiques dans les fards blancs ou comme pigments dans la peinture (blanc de plomb). Ils existent à l'état naturel (cérasite), mais ont été aussi synthétisés dès l'époque grecque. Grâce à la mesure des isotopes du carbone, il est possible de distinguer une exploitation du minéral d'une production artificielle. Nous présenterons différents cas et nous focaliserons ensuite notre exposé sur les cosmétiques grecs et égyptiens produits entre le 3<sup>ème</sup> millénaire et le 3<sup>ème</sup> siècle av. J.-C. Par ailleurs, nous montrerons que les carbonates de plomb synthétisés peuvent être datés par la méthode du carbone 14.

**Mots-Clés:** cérasite, blanc de plomb, radiocarbone

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: lucile.beck@cea.fr

## Etude géochimique des concrétions carbonatées de l'aqueduc romain de Nîmes : une archive environnementale pour les premiers siècles ap. J.-C. ?

Yacine Benjelloun <sup>\*ψ1</sup>, Julie Carlut <sup>1</sup>, Jean-François Hélie <sup>2</sup>, Gilles Chazot <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) – Institut national des sciences de l’Univers, Université Paris Diderot - Paris 7, CNRS: UMR7154- France

<sup>2</sup> GEOTOP Centre de recherche en géochimie et géodynamique (GEOTOP) – Canada

<sup>3</sup> Laboratoire Domaines Océaniques, Institut Universitaire Européen de la Mer – University of Brest – Place Nicolas Copernic 29380 Plouzané,, France

Les deux derniers millénaires ont été marqués par l’impact croissant des activités humaines sur leur environnement. Bien connues à l’échelle mondiale pour l’époque industrielle, les traces de cet impact ont aussi été mises en évidence à des périodes plus anciennes sur des zones plus réduites. La période romaine présente à cet égard un grand intérêt puisque la romanisation de nombreux espaces en Méditerranée s’est accompagnée d’une anthropisation notable. Les premiers siècles de notre ère sont généralement associés à un climat stable et chaud en Méditerranée. L’étude d’archives sédimentaires couplant haute résolution temporelle et forte sensibilité aux évolutions locales de l’environnement est nécessaire pour passer de ce cadre général à l’échelle régionale. De façon analogue aux spéléothèmes, des dépôts carbonatés laminés peuvent se développer dans les chenaux des aqueducs qui acheminaient l’eau de sources karstiques pendant l’époque romaine. En plus de leur intérêt paléoenvironnemental, ces concrétions peuvent aussi fournir des informations d’ordre hydraulique et sur la chronologie de l’utilisation des aqueducs. Les dépôts de l’aqueduc de Nîmes sont exceptionnels puisqu’ils constituent une possible archive paléoenvironnementale de 200 ans avec une résolution saisonnière. Les observations en micro- scopie optique réalisées sur ce type de dépôts ont mis en évidence une structure en fines lames successives, alternativement sombres et claires, qui est généralement reliée au fonctionnement saisonnier du système karstique alimentant l’aqueduc. Le  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ , ainsi que les éléments traces ont été mesurés le long de trois échantillons de concrétions provenant de cet aqueduc. La comparaison des signaux géochimiques avec la microtexture des dépôts a permis de mettre en évidence la nature saisonnière de la lamination observée. Les variations des proxies mesurés sont discutées en termes de variations environnementales sur la période 50-225 ap. J.-C. Nos résultats suggèrent des conditions climatiques relativement stables durant cette période, en parallèle d’un changement du couvert végétal du karst probablement lié à une croissance de l’exploitation agricole des terres. Des variations chimiques et texturales ponctuelles peuvent également être liés à de brefs épisodes climatiques particuliers.

**Mots-Clés:** géoarchéologie, concrétions carbonatées, aqueduc, isotopes stables, éléments traces, paléoenvironnement

<sup>\*</sup>Intervenant

## Approches de la paléogéographie de deux sites archéologiques en contexte littoral par méthodes géophysiques : études préliminaires à l'implantation de carottages paléoenvIRONnementaux

Guillaume Bruniaux <sup>\*1</sup>, Vivien Mathé <sup>1</sup>, Camille Faisse <sup>2</sup>, Adrien Camus <sup>1</sup>, Clément Flaux <sup>2</sup>,  
Carole Romey <sup>1</sup>, Pierre Stephan <sup>5</sup>, Corinne Sanchez <sup>2</sup>, Vincent Ard <sup>7</sup>

<sup>1</sup> Littoral, Environnement et Sociétés (LIENSs) – CNRS : UMR7266, Université de La Rochelle – Institut du Littoral et de l’Environnement, 2 rue O. de Gouges 17000 La Rochelle, France

<sup>2</sup> Archéologie des Sociétés Méditerranéennes (ASM) – INRAP, Ministère de la Culture et de la Communication, CNRS : UMR5140, Université Paul Valéry - Montpellier III – 390 av de Pérols - 34970 LATTES, France

<sup>5</sup> Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique (LETG - Géomer) – CNRS : UMR6554, Université de Bretagne Occidentale (UBO) – Place Nicolas Copernic, 29280 Plouzané, France

<sup>7</sup> Travaux et Recherches Archéologiques sur les Cultures, les Espaces et les Sociétés (TRACES) – CNRS : UMR5608, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II –5 Allée Antonio Machado 31058 TOULOUSE CEDEX 9, France

L'approche paléogéographique et paléoENVIRONnementale d'un site archéologique permet de replacer l'occupation humaine dans son contexte environnemental, et ainsi de comprendre les liens entre les activités du site et le choix de son implantation. Les études paléoENVIRONnementales en relation avec un site archéologique sont effectuées à partir de carottes sédimentaires. Pour optimiser les résultats de ces études, tant d'un point de vue financier que scientifique, il est nécessaire de sélectionner une zone d'implantation des carottages ayant des caractéristiques sédimentaires et morphologiques concordantes avec les objectifs de l'étude. Nous proposons de baser ce choix sur une reconstitution paléogéographique obtenue à partir de prospections géo- physiques multi-méthodes et multi-échelles. Une combinaison de méthodes géophysiques a été testée et appliquée sur deux zones d'étude en contexte littoral : le site des ports antiques de Narbonne (Aude) localisé dans l'ancien delta de l'Aude et le site néolithique du Pontet (Charente-Maritime) situé près de l'estuaire de la Charente. Des prospections électromagnétiques par méthode *Slingram* (carte de conductivité apparente ; 2D horizontale) et des sections de résistivité électrique (2D verticale) sont effectuées pour identifier des anomalies associées à des structures sédimentaires à une échelle plurimétrique et sur de vastes surfaces ( $> 100$  ha). En complément, des diagraphies électriques (1D verticale) permettent une approche plus fine en caractérisant des variations sédimentaires pluri-centimétriques. Cette approche paléogéographique permet ainsi de caractériser de potentielles structures sédimentaires telles des paléo-chenaux, des formations deltaïques ou des dépôts d'éboulement issus de l'érosion de paléo-falaise. Cette combinaison de méthodes géophysiques est utilisée pour cibler l'implantation des carottages paléoENVIRONnementaux afin de comprendre l'évolution géomorphologique des zones étudiées. Cette interaction disciplinaire entre les différents acteurs (géophysicien, géomorphologue, archéologue) n'est pas à sens unique. La confrontation entre la géophysique et les carottages permet de vérifier les hypothèses d'interprétation des anomalies géophysiques, autorisant une lecture continue des structures sédimentaires (déterminées par l'analyse des carottes) et de la géomorphologie littorale.

**Mots-Clés:** prospection géophysique, milieux littoraux, géomorphologie, géoarchéologie, carottage, diagraphie électrique

## Discrimination spatiale au sein d'une enceinte fossoyée néolithique pour estimer la localisation d'un niveau d'occupation

Guillaume Bruniaux <sup>\*ψ1</sup>, Vivien Mathé <sup>φ1</sup>, Vincent Ard <sup>§ 2</sup>, Francois Lévêque <sup>¶1</sup>

<sup>1</sup> Littoral ENVironnement et Sociétés - UMR 7266 (LIENSs) – Université de La Rochelle, CNRS: UMR7266 – France

<sup>2</sup> Travaux et Recherches Archéologiques sur les Cultures, les Espaces et les Sociétés (TRACES) – CNRS : UMR5608, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II -5 Allée Antonio Machado 31058 TOULOUSE CEDEX 9, France

Le site néolithique du Pontet (Saint-Nazaire-sur-Charente, Charente-Maritime) est implanté sur un plateau calcaire et accolé à une paléo-falaise formant le versant d'une petite vallée. Il est localisé à environ 5 km de l'estuaire de la Charente. Il a été découvert en 2009 par E. Bouchet sur des clichés aériens montrant la présence de quatre fossés discontinus attribués au Néolithique récent.

Une campagne de prospection magnétique à haute résolution a été effectuée sur l'ensemble site (5 ha) en employant un protocole original de cartographie magnétique (Bruniaux et al., 2017). Elle précise le tracé des fossés de l'enceinte et met en évidence deux autres enceintes, une imposante entrée avec des " pinces de crabe ", des fosses et des trous de poteau. Ces données ont été complétées par des cartes et des sections de résistivité électrique. Sur la base de ces informations, un sondage a été réalisé sur une surface de 400 m<sup>2</sup> au niveau de quatre anomalies magnétiques circulaires et alignées, supposées être des fosses néolithiques.

La fouille a permis de comprendre l'origine de ces quatre anomalies magnétiques et a mis en évidence la présence d'un niveau d'occupation néolithique conservé. Cette communication propose un protocole fondé sur une prospection magnétique exhaustive du site, des prospections électriques, une image multispectrale et un sondage d'extension limitée pour obtenir une estimation de l'épaisseur de sol recouvrant le substrat. Cette estimation apporte une information sur la conservation potentielle d'un niveau d'occupation néolithique. Cette démarche vise à guider les prochaines investigations archéologiques sur des sites néolithiques de même type.

Bruniaux, G., Mathé, V., Lévêque, F., Camus, A., Ard, V., 2017. Data processing chain to high spatial resolution magnetic survey: application on the Neolithic site of Le Pontet (Charente-Maritime, France). *Archaeological Prospection*, 24, (3). DOI: 10.1002/arp.1590

**Mots-Clés:** prospection magnétique, prospection électrique, sondage, Néolithique, enceinte fossoyée, archéométrie

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: guillaume.bruniaux@univ-lr.fr

## Premiers résultats pour la reconstitution technologique de la production préhistorique traditionnelle de cuivre au Complexe de Vilabouly, Laos central

Mélissa Cadet <sup>\*1</sup>, Philippe Dillmann <sup>2</sup>, Nigel Chang <sup>3</sup>, Viengkeo Souksavatdy <sup>4</sup>, Thomas Oliver Pryce <sup>5</sup>

<sup>1</sup> UMR 7055 Préhistoire et Technologie (PreTech) – Université Paris Ouest Nanterre La Défense – France

<sup>2</sup> Laboratoire archéométallurgique et prévision de l'altération (LAPA) – CEA-DRF-IRAMIS – France

<sup>3</sup> Département d'Anthropologie, archéologie et sociologie, James Cook University – Australie

<sup>4</sup> Département des musées, monuments historiques et d'archéologie, Ministère de l'information et de la culture, Vientiane – Laos

<sup>5</sup> UMR 7055 Préhistoire et Technologie (PreTech) – Université Paris Ouest Nanterre La Défense – France

Depuis 2008, une équipe Lao-australienne dirigée par Dr. Nigel Chang et Viengkeo Souksavatdy en association avec la société minière MMG-LXML fouille des sites d'extraction et de réduction de cuivre dans la province de Savannakhet au centre du Laos. Le Complexe de Vilabouly, avec une séquence radiocarbone des débuts de l'Age du Bronze (c.1000 av. J.-C) à la fin de l'Age du Fer (c. 500 ap. J.-C) fait partie des trois seuls centres de production de cuivre préhistorique connus en Asie du Sud-Est, les deux autres étant en Thaïlande. La signature isotopique de la production de cuivre du Complexe de Vilabouly a été identifiée parmi les échanges de cuivre en Asie du Sud-Est continental, impliquant des consommateurs de métal du Myanmar jusqu'au Cambodge. Deux principales aires montrant des évidences de productions de cuivre au sein du Complexe de Vilabouly ont été sélectionnées pour étude : Puen Baolo et Tong Na Nguak. Des artefacts liés à la réduction de cuivre y ont été découverts (minéraux, scories, creusets, moules et argiles rubéfiées) ainsi que des produits et demi-produits en métal (lingots, tambours, haches...) dont certains présentent des influences stylistiques du Vietnam et de Chine. Le matériel lié à la production de cuivre est étudié par une approche archéométallurgique : observations macroscopiques et microscopiques par une caractérisation des phases et de la composition des différents matériaux à l'aide de diverses techniques (microscopie optique, microscopie électronique à balayage, spectroscopie Raman, fluorescence X) ainsi que des analyses isotopiques du plomb pour les objets en métal. Les résultats obtenus serviront à proposer une première reconstitution des techniques de productions (réduction, affinage, alliage et procédés de fonte) pour le site ainsi que ses implications dans les réseaux d'échanges de métaux en Asie du Sud-Est durant la Préhistoire.

**Mots-Clés:** cuivre, production, circulation, Complexe de Vilabouly, Asie du Sud Est

\*Intervenant

## Les constructeurs Romains face aux risques géologiques: L'exemple d'une section de l'aqueduc Aqua Augusta dans la région de Naples

Julie Carlut <sup>\*1</sup>, Francesca Filocamo <sup>1</sup>, Hélène Dessales <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) – CNRS: UMR7154 – France

<sup>2</sup> AOROC-UMR 8546, Ecole normale supérieure/IUF, 45 rue d'Ulm, 75005 Paris, France – Ecole Normale Supérieure de Paris - ENS Paris – France

Quatre échantillons de carbonates de deux sites de l'aqueduc Augustus (Aqueduc Romain du Serino) ont été étudiés afin de mieux contraindre l'histoire de l'aqueduc et d'estimer dans quelle mesure des aléas géologiques peuvent être enregistrés dans de tels dépôts. Des observations micromorphologiques, des analyses des éléments traces, des analyses des isotopes de l'oxygène et du carbone ont été effectuées sur les échantillons. Ensemble avec de nouvelles observations quantitatives sur les techniques de construction de l'aqueduc, nos résultats soulignent l'empreinte laissée par les aléas géologiques sur l'aqueduc du Serino. Des destructions, des changements de route, des mouvements du sol et une coulée de boue sont mis en évidence dans la période qui précède l'éruption du Vésuve en 79 AD.

**Mots-Clés:** Carbonates

<sup>\*</sup>Intervenant

## Approche socio-culturelle des remplissages de canaux : pratiques et techniques de la gestion de l'eau en milieu contraignant.

Lucie Cez

Archéologies et Sciences de l'Antiquité (ArScAn) - Université Paris I - Panthéon-Sorbonne, CNRS : UMR7041,  
Université Paris X - Paris Ouest Nanterre La Défense - France

Deux décennies de recherche menées sur les remplissages de fossés et de canaux à ciel ouvert ont démontré le haut potentiel informatif de leurs comblements pédo-sédimentaires tant sur les dynamiques paléoenvironnementales (hydrologie, climat et tectonique) que sur les pratiques socio-économiques liées à la gestion de l'eau. La gestion de l'eau au sens restrictif de maîtrise des écoulements entrant et sortant du réseau de canaux est centrée sur la captation de la ressource à l'amont ou sa distribution à l'aval, tandis qu'au cours de son acheminement, la gestion de l'eau canalisée est le plus souvent délaissée. Pourtant, dans le corps du système d'irrigation, la gestion de l'eau est intense et méticuleuse requérant à la fois un contrôle des caractéristiques physiques des canaux (altitude, pente, morphologie) et le maintien d'une circulation hydrique optimale (entretien).

A Sarazm, dans la vallée semi-aride du Zeravchan (Tadjikistan), l'étude géoarchéologique d'un canal d'irrigation fonctionnel durant la période du Bronze ancien (III<sup>e</sup> millénaire avant notre ère) a permis de documenter les pratiques et techniques liées à la gestion de l'eau canalisée. Cette gestion intervient dans un contexte régional contraignant, caractérisé à la fois par la variabilité spatio-temporelle de la ressource en eau et une activité sismique récurrente.

La lecture pédostratigraphique est prolongée ici par une étude micromorphologique du comblement du canal permettant de restituer la complexité de l'histoire fonctionnelle de ce canal. Elle est en effet constituée d'une phase de mise en eau, d'une phase de fonctionnement courant et de phases d'arrêt et de dysfonctionnement. Chacune de ces phases est associée à un ensemble d'opérations de maintenance spécifiques impliquant des savoirs-faires, la pratique de gestes ainsi que l'usage d'outils et de matériaux. Leur inscription dans les enregistrements sédimentaires du remplissage du canal offre un panel d'empreintes permettant d'enrichir la connaissance des dynamiques socio-culturelles liées à la gestion de l'eau, de même que leur spécificité et leur rythmicité en milieu contraignant.

**Mots-Clés:** géoarchéologie, canaux, remplissages sédimentaires, micromorphologie, gestion de l'eau, Asie centrale

## Une collection de référence de roches riches en oxy(hydroxy)des de fer pour identifier les sources d'approvisionnement en matières colorantes utilisées pendant la Préhistoire

Emilie Chalmin <sup>\*1</sup>, Hélène Salomon <sup>1</sup>, Jean-Victor Pradeau <sup>2</sup>, Julien Monney <sup>1</sup>, Claire Chanteraud <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne (EDYTEM) – Université Savoie Mont Blanc, CNRS:  
UMR5204, 73376 Le Bourget du Lac cedex, France

<sup>2</sup> UMR 7264 CEPAM – Université de Nice Sophia-Antipolis – France

Les matières colorantes ont été utilisées par les populations préhistoriques depuis plus de 300 000 ans dans diverses activités avec des objectifs qui ne sont pas toujours clairement identifiés. Pour les désigner, l'utilisation fréquente des termes "pigment" ou "ocre", parfois abusive, ne permet pas de décrire objectivement ces matières. Celles-ci présentent un certain nombre de propriétés physico-chimiques qui permettent de les transformer (façonnage, réduction en poudre, mélange avec d'autres substances), de les appliquer sur différents supports pour en modifier l'aspect ou de les utiliser comme matière-outil. De la source d'approvisionnement jusqu'à l'utilisation, ces actions de transformation induisent des modifications irrémédiables de la ressource minérale d'origine. Afin d'identifier les stratégies d'approvisionnement en matières premières colorantes et d'en appréhender les implications techno-économiques, il est nécessaire de déterminer les origines (géologiques, voire géographiques) des matières colorantes issues de différents contextes archéologiques en développant une méthodologie robuste. Ainsi, il est important d'affiner :

- le tableau de l'ancien paysage minéral et des aires économiques que se sont appropriées les populations préhistoriques et dans lesquels ont été échangé au cours du temps matières premières ou transformées ;
- la compréhension des choix des matières premières colorantes parmi la diversité de ressources disponibles, en comparant ces stratégies d'acquisition à celles mises en place pour d'autres types de matières, comme les roches siliceuses taillables (cf. *Réseau des Lithothèques*) ;
- la lecture des principaux critères objectifs conditionnant ces choix ayant des implications sur les chaînes d'exploitation.

Dans cet objectif, est établi un référentiel régional de roches riches en oxy(hydroxy)des de fer, incluant des données pétrologiques, physiques et chimiques, adossé à un SIG. Des enquêtes systématiques à partir de différentes sources de documentation nous conduisent à décrire et échantillonner sur le terrain les gîtes à l'affleurement et leur dynamique au cours du temps sous l'action de phénomènes naturels (érosion, recouvrement) et anthropiques (exploitations minières). L'identification de marqueurs spécifiques pourra être utilisée en vue d'une comparaison avec des vestiges archéologiques : blocs de matière colorante, résidus sur outils, matière picturale, etc. Cette "pigmentothèque" se focalise depuis 2 ans sur les vallées de l'Ardèche et du Gard, considérant le fort potentiel de formations géologiques favorables à la présence de roches ferrugineuses ainsi que la proximité des sites préhistoriques ornés et d'habitat.

**Mots-Clés:** roches ferrugineuses, Préhistoire, minéralogie, approvisionnement, pétrographie, géochimie

## Saint-Nazaire de Corme-Royal (17): cas d'étude non-invasive d'un bâtiment difficilement accessible

Estelle Chargé <sup>\*1,2</sup>, Jean-Baptiste Javel <sup>2</sup>, Christian Gensbeitel <sup>2</sup>, Pierre Guibert <sup>2</sup>, Quitterie Cazes <sup>1</sup>

<sup>1</sup> France, Amériques, Espagne – Sociétés, pouvoirs, acteurs (FRAMESPA) – Université Toulouse - Jean Jaurès, CNRS:  
UMR5136 – France

<sup>2</sup> Institut de Recherches sur les Archéomatériaux (IRAMAT-CRP2A) – université Bordeaux Montaigne, CNRS:  
UMR5060 – France

L'église de Corme-Royal est un bâtiment très remanié, aujourd'hui partiellement privé, situé au centre d'un bourg charentais. Le site est évoqué dès 1047 comme fondation prieurale de l'Abbaye-aux-Dames de Saintes. Si la documentation historique qui la concerne est particulièrement clairsemée, son analyse est possible grâce aux archives iconographiques, aux indices topographiques, architecturaux et ornementaux.

Le sanctuaire est célébré pour la sculpture de sa façade occidentale, mais l'ensemble du site - plus complexe - n'a jamais fait l'objet de travaux avancés, faute de suivi archéologique à travers des restaurations ou travaux d'aménagement. L'église que nous observons aujourd'hui montre un plan hétéroclite, résultat de la permanence d'emploi du bâtiment entre le XII<sup>e</sup> et le XVII<sup>e</sup> siècle. Suite à son classement au titre des Monuments Historiques en 1907, l'édifice fait l'objet de lourds travaux de restauration, intervenant notamment sur la façade. Grâce aux recherches en archives et à une analyse fine du massif occidental, la dissociation des éléments anciens et modernes a pu être réalisée. Une analyse spatiale du décor original permet alors de restructurer une partie des ambitions visuelles romanes du site.

Si aujourd'hui seule l'église est accessible, les bâtiments privés au sud, séparés du bourg par un ensemble de clôtures maçonniées, modifient le regard que nous pouvons porter sur cette paroissiale très remaniée. La structure d'un ancien transept a été découverte au sud de l'église, faisant jonction entre le sanctuaire et les quelques éléments d'habitation encore en élévation. Ces éléments renvoient au passé monastique du site. L'intervention devant se dérouler rapidement, en accord avec les propriétaires du site, une couverture topographique et macrophotographique des élévations a été réalisée. Les données, une fois traitées et recoupées avec celles des parties publiques de l'église ont permis de mettre en évidence la continuité entre le sanctuaire et les bâtiments d'habitations, dégageant une aire claustrale au sud.

L'intervention menée à Corme-Royal a permis de mieux appréhender le contexte de fondation et d'emploi d'un bâtiment à la fois négligé et fantasmé. Nous avons aussi pu révéler le potentiel du site, à l'interface entre les mondes monastiques et paroissiaux.

**Mots-Clés:** archéologie, archéométrie, patrimoine, bâti, matériaux, analyse non invasive, roman, charente, maritime

\*Intervenant

## À la recherche du prieuré disparu autour de l'église Saint-Vivien de Geay (17)

Estelle Chargé <sup>1,2</sup>, Jean-Baptiste Javel <sup>2</sup>, Christian Gensbeitel <sup>2</sup>, Pierre Guibert <sup>2</sup>, Quitterie Cazes <sup>1</sup>

<sup>1</sup> France, Amériques, Espagne – Sociétés, pouvoirs, acteurs (FRAMESPA) – Université Toulouse - Jean Jaurès, CNRS:  
UMR5136 – France

<sup>2</sup> Institut de Recherches sur les Archéomatériaux (IRAMAT-CRP2A) – université Bordeaux Montaigne, CNRS:  
UMR5060 – France

L'église Saint-Vivien est un petit édifice roman autour duquel s'est développé le bourg de Geay, en Charente-Maritime. Classée au titre des Monuments Historiques le 29 janvier 1907 par Albert Ballu, quelques courtes notices ont pu mettre en avant la singularité de l'église. Remarquée pour son chevet à pans coupés à trois registres et composé d'une ornementation architectonique très fournie, l'édifice n'a cependant jamais fait l'objet d'une réelle étude. En apparence homogène, l'église Saint-Vivien est un parfait exemple d'édifice où s'entremêlent des restaurations et reconstructions anciennes, peu, voire pas, documentées, rendant difficile la lecture et la compréhension de la mise en œuvre de ses différentes parties.

Située sur les hauteurs du bord de la Charente, l'église est le reliquat d'un petit établissement, dépendant de l'abbaye de La Chaise-Dieu, cité à partir de 1178. Contrairement à d'autres sites casadéens saintongeais, tel que le prieuré de Sainte-Gemme qui possède une organisation claustrale, Geay, fait partie de ces petits établissements gérés par un faible nombre de moines, et probablement, en dehors de tout cadre conventuel. Plusieurs indices permettent toutefois de poser quelques hypothèses quant à l'organisation du prieuré et à la circulation des moines et des membres de la paroisse autour et au sein de l'édifice. Le cimetière paroissial est présent au sud de l'église jusqu'au premier quart du XXe siècle. La bâtie des seigneurs de Geay est traditionnellement située au pied de l'église, au sud-ouest, à l'emplacement d'un actuel corps de ferme. Il est probable qu'il y ait au moins la présence d'un bâtiment monastique à proximité immédiate de l'église au nord, directement desservi par la porte latérale du transept, actuellement utilisée pour l'actuelle sacristie. Lors de la construction de cette dernière, la réutilisation et la réouverture d'une porte ancienne est mentionnée. Le mur sud du transept nord présente les traces d'une toiture en bâtière encore visible, probablement en lien avec une ancienne porte murée à mi-hauteur de l'élévation.

Des prospections géophysiques tout autour de l'édifice et dans les champs alentour pourraient aider à la localisation des différents espaces et bâtiments alloués au monastère, mais également à la paroisse. À terme, l'objectif est de pouvoir recontextualiser l'implantation, la construction et l'activité du prieuré, au sein d'un réseau territorial et monastique dynamique.

**Mots-Clés:** archéologie, archéométrie, patrimoine, bâti, matériaux, analyse non, invasive, roman, charente, maritime

\*Intervenant

## Le site de la transition âge du Bronze – âge du Fer du Gros-Buisson à Villiers-sur-Seine (77), de l'intrasite au bassin moyen de la Seine : réflexions sur la place de la géoarchéologie en archéologie

Christine Chaussé <sup>\*1</sup>, Chantal Leroyer <sup>ψ2</sup>, Sylvie Coubray <sup>3</sup>, Rebecca Peake <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Géographie Physique - Environnements quaternaires et actuels (LGP) – Université Panthéon-Sorbonne, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12, CNRS: UMR8591 – bat. Y 1 Place Aristide Briand 92195 MEUDON CEDEX, France et INRAP –, 121 rue d'Alesia, 75014 Paris, France

<sup>2</sup> Centre de Recherche en Archéologie, Archéosciences, Histoire (CReAAH) – CNRS-Université de Rennes1 : UMR6566 – France et Ministère de la Culture – France

<sup>3</sup> INRAP – France et Archéozoologie, archéobotanique: sociétés, pratiques et environnements – CNRS : UMR7209, Sorbonne Universités, UPMC, CNRS – France

<sup>4</sup> - ArTheHiS (UMR 6298), Université de Bourgogne, 6 Boulevard Gabriel, F-21000 DIJON – Institut national de recherches archéologiques préventives – France et INRAP (Pantin) – France

Villiers-sur-Seine "Gros-Buisson" est un site fortifié de la fin de l'âge du Bronze – début du 1er âge du Fer, situé dans la vallée de la Seine en Bassée (77). Occupant une diffluence fluviale cernée au nord et au sud par le lit du fleuve et l'un de ses bras, il est fermé à l'ouest par un système de fossés monumentaux. Dans cet espace totalement circonscrit de moins de 2 hectares, près d'un millier de structures archéologiques documentent un habitat dense rapporté autour de 900 av. JC.

L'étude géoarchéologique engagée à Villiers-sur-Seine se décline à différentes échelles de temps et d'espace. A l'échelle de la structure archéologique (fosses de rejets), elle a permis de reconnaître des fragments d'enduits à la chaux. Couvrant probablement les parois clayonnées de bâtiments, ce géomatériau utilisé ici dans l'architecture n'avait été jusque-là documenté que pour l'Antiquité. A l'échelle de l'emprise du site et en association avec l'analyse des données botaniques (palynologie et anthracologie), l'étude a permis i/ de restituer l'évolution de cette portion du fond de vallée depuis le début de l'Holocène et de documenter le milieu au moment de l'occupation principale du site ; ii/ de synchroniser la fortification du site avec la reprise des écoulements fluviaux dans le bras secondaire de la Seine. Enfin, à l'échelle du bassin moyen de la Seine (Troyes-Rouen), l'étude contribue à l'analyse de l'évolution hydroclimatique du fleuve depuis le début de l'Holocène.

La géoarchéologie et ses outils (ici la micromorphologie et la géomorphologie fluviale) fédèrent un ensemble d'analyses contribuant aux approches sédimentaires dans un contexte archéologique. Elle intéresse les espaces qui constituent des lieux de vie, depuis les plus étroits et leur utilisation/aménagement (ici la chaux), jusqu'aux places résidentielles (ici un village fortifié). Combinée avec des biomarqueurs (ici la palynologie), elle contribue aussi aux restitutions paléogéographiques ainsi qu'au développement d'analyses climato-sédimentaires à des échelles spatio-temporelles plus vastes. Si sa confrontation avec les données archéologiques locales à ultra-locales permet souvent d'ouvrir des perspectives dans l'interprétation fonctionnelle des sites, la géoarchéologie, à quelques exception près, peine plus à s'imposer aux échelles régionales à macro-régionales.

**Mots-Clés:** géoarchéologie, géomorphologie fluviale, micromorphologie, bassin de la Seine moyenne, Holocène, Protohistoire. <sup>ψ</sup>Auteur correspondant: chantal.leroyer@univ-rennes1.fr



## La notion de "carbonates archéologiques", paradigme nouveau d'une géoarchéologie entre nature et culture : une définition de faciès anthropiques, reflets des dynamiques socio-environnementales du passé

Julien Curie

UMR 7041 ARSCAN "Archéologie et sciences de l'Antiquité", Équipe "Archéologies environnementales" – Université Paris I - Panthéon-Sorbonne - France

Les dépôts carbonatés continentaux précipités par certaines eaux chaudes (travertins) ou froides (tufs calcaires, spéléothèmes) sont utilisés depuis de nombreuses années comme enregistreurs fiables des paléoenvironnements. Leur prise en compte en contexte hors et intra-site archéologique croît depuis plusieurs années maintenant, en témoigne une bibliographie florissante, et offre une problématique originale et pertinente à la question des interactions Homme- Environnement sur les temps long et court. Il s'agira ici, d'une part, de proposer une classification de ses "carbonates archéologiques" selon leur degré d'anthropisation et, d'autre part, d'établir à l'aide d'exemples précis un catalogue exhaustif des faciès anthropogéniques, prenant en compte les caractéristiques morphologiques, sédimentologiques et géochimiques des carbonates. Nous mettrons en lumière le potentiel qu'offrent les carbonates archéologiques pour la reconstitution des dynamiques paléoenvironnementales (variations paléohydrologiques et paléoclimatiques) ainsi que pour l'enregistrement d'activités géodynamiques (séismes et volcanisme). En parallèle, les carbonates archéologiques s'avèrent également être d'excellentes archives sédimentaires de la gestion de l'eau par les sociétés du passé. Ce dernier point sera l'occasion de développer des modèles de réflexion autour du concept de mémoire de l'eau, dans une optique socio-culturelle multiparamétrique - cultes des eaux, aménagements et ingénierie hydrauliques, politiques de l'eau - en insistant sur les perspectives méthodologiques à pérenniser.

**Mots-Clés:** Géoarchéologie, Carbonates, Faciès anthropogéniques, Dynamiques paléoenvironnementales, Mémoire de l'eau

## Enregistrement sédimentaire et évolution des paysages dans la moyenne vallée de la Seine (Plaine de Troyes) de la fin du Néolithique à l'époque Médiévale : approche et perspective géoarchéologiques

Grégory Dandurand <sup>\*1,2</sup>, Vincent Riquier <sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Institut National de Recherches Archéologiques Preventives (INRAP) - France

<sup>2</sup> Travaux et recherches archéologiques sur les cultures, les espaces et les sociétés (TRACES) - Université Toulouse 2 Jean Jaurès, CNRS : UMR5608 - France

<sup>3</sup> Institut national de recherches archéologique préventives (St-Martin-sur-le-Pré) - France

<sup>4</sup> Trajectoires - CNRS : UMR8215, Université Panthéon-Sorbonne, Université Panthéon-Sorbonne - France

Depuis une vingtaine d'années, la multiplication des opérations d'archéologie préventives (diagnostics et fouilles) dans le secteur de la Plaine de Troyes (Champagne, Aube) a conduit à un projet collectif de recherche (PCR) " La Plaine de Troyes : évolution d'un territoire rural des premiers agriculteurs au premier réseau villageois " (2013-2016). La problématique centrale est de comprendre l'évolution de ce territoire, à la croisée de plusieurs milieux géographiques plutôt favorables à diverses formes d'occupation humaine, depuis la naissance d'un premier paysage agraire jusqu'à la formation du premier réseau villageois, et la fixation relative des zones habitées. D'après les données disponibles, les courbes de tendances depuis le Néolithique projettent une succession de phases de croissance puis de repli de durée et d'amplitude très variables.

Si l'occupation humaine contrastée de ce secteur est bien attestée depuis le Néolithique moyen, les relations que les sociétés anciennes entretenaient avec leur environnement restent cependant à clarifier. Les absences et les vides interrogent tout autant que l'abondante documentation de certaines phases : sur ou sous-représentation des données archéologiques ? Quel est l'impact réel des mécanismes taphonomiques ? Quel rôle joue l'évolution paléo-environnementale et paléo-climatique dans l'occupation ou l'abandon des sites ?

Afin de mieux appréhender les logiques d'implantation et d'occupation de cette zone humide, il est indispensable de mieux reconstituer leur évolution morpho-sédimentaire au cours de l'Holocène moyen, en lien avec les variations hydro-climatiques, pouvant potentiellement expliquer les différentes phases d'occupation et d'abandon des sites de la moyenne vallée de la Seine. Les nombreux relevés de coupes et logs stratigraphiques associés à des datations 14C ont permis d'identifier au moins trois séquences chronostratigraphiques séparées des phénomènes de troncatures entre les couches remaniant des matériaux anciens et affectés par des phénomènes de pédogenèse (bioturbation, accumulations de matière organique, mur irrégulier). Si la pédogenèse Boréal-Atlantique n'est que partiellement enregistrée dans des secteurs en position d'abri, en revanche, la phase de déstabilisation paléo-environnementale du Bronze moyen ainsi que la courte période de pédogenèse entre le Bronze final et le début du Second Âge du fer sont souvent bien marquée d'un point de vue morpho-sédimentaire. Le signal paléo-environnemental se brouille à partir de l'époque gallo-romaine. L'anthropisation croissante du fond de la plaine alluviale conduit à une fragilisation des sols qui deviennent très sensibles aux moindres variations hydro-climatiques, comme celles du Petit Âge Glaciaire.

**Mots-Clés:** Paléoenvironnement, Sédimentologie, Archéologie, Holocène, Seine, Plaine alluviale

## Did you say Peaty Sediments? L'étude des macro-restes issus des sédiments tourbeux holocènes pour reconstituer la dynamique des écosystèmes et les impacts anthropiques

André-Marie Dendievel <sup>\*1,2</sup>, Hervé Cubizolle <sup>1</sup>, Jacqueline Argant <sup>3</sup>, Jean-François Berger <sup>4</sup>,  
Emmanuelle Defive <sup>5</sup>, Benjamin Dietre <sup>2,6</sup>, Jean-Paul Raynal <sup>7</sup>, Jean Nicolas Haas <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Environnement Ville Société (EVS) – Université Jean Monnet [Saint-Etienne] : UMR5600 – France

<sup>2</sup> Institute of Botany Innsbruck (IUBK) – Autriche

<sup>3</sup> Laboratoire méditerranéen de préhistoire Europe-Afrique (LAMPEA) – CNRS : UMR7269, INRAP, Ministère de la Culture et de la Communication, Aix Marseille Université : UMR7269 – France

<sup>4</sup> Environnement Ville Société (EVS) – Université Lumière - Lyon 2 : UMR5600 – France

<sup>5</sup> Laboratoire de Géographie Physique et Environnementale (GEOLAB) – Université Clermont Auvergne – France

<sup>6</sup> Laboratoire Chrono-environnement (LCE) – UMR6249 – France

<sup>7</sup> De la Préhistoire à l'Actuel : Culture, Environnement et Anthropologie (PACEA) – CNRS : UMR5199 – France

Conservés en contexte archéologique ou " hors-site ", les sédiments " tourbeux ", riches en macro-restes, constituent des intégrateurs spatio-temporels des changements environnementaux. Ces dépôts sont souvent utilisés dans les études géomorphologiques, paléoenvironnementales et géoarchéologiques pour préciser les modalités de la co-évolution climats-milieux-sociétés. Ils nécessitent une étude approfondie de leur contenu micro- et macroscopique ainsi que de leurs conditions de sédimentation, très variables d'un site à l'autre.

Cette communication expose les résultats de recherches basées sur une étude paléo-écologique de bio-indicateurs locaux préservés dans les sédiments organiques : les macro-restes végétaux (graines, bourgeons, chatons, feuilles, tiges, macro-charbons), animaux (restes d'insectes surtout), fongiques et inorganiques. L'identification taxonomique précise, la multiplicité des macro-restes et leur modalité d'accumulation permettent de reconstituer les conditions environnementales à l'échelle locale (végétation, humidité, érosion, occupation du sol). On peut ainsi *in fine* préciser l'évolution de la biodiversité au cours du temps, information indispensable à la réflexion sur la gestion et la conservation de ces milieux.

Ainsi, en moyenne montagne, sur le plateau du Béage (Ardèche, SE du Massif central, France), l'étude des macro-restes des séquences tourbeuses a permis de préciser la nature et l'évolution des impacts anthropiques au cours de l'Holocène. Egalement efficiente dans certains dépôts alluviaux, l'étude du contenu des sédiments " tourbeux " a contribué à caractériser la construction des petites plaines alluviales de la moyenne vallée du Gage (Ardèche, France) et de Gourgon-Carex (Loire, France) à partir de l'époque médiévale. En basse plaine alluviale, l'analyse des sédiments " tourbeux " prélevés près d'un habitat gallo-romain à Chalon-sur-Saône (Saône-et-Loire, France) permettent de préciser les modalités de comblement d'un paléo-chenal. Comme le montrent ces exemples, la lecture des sédiments organiques " tourbeux " et la caractérisation de leur contenu en macro-restes révèlent un fort potentiel pour restituer les conditions environnementales locales et leur évolution sous l'influence des forçages naturels et anthropiques.

**Mots-Clés:** tourbe, dépôts alluviaux, macrorestes, paléoécologie, hydroécosystèmes, climats, mi- lieux, sociétés médiévales

## Exploration de 170 hectares de plaine maritime (estuaire de l'Aa, Nord de la France) : restitution de la fermeture d'un estuaire au Moyen Age et mise en évidence de mares endiguées

Laurent Deschodt <sup>\*ψ1,2</sup>, Mathieu Lançon <sup>1,3</sup>, Samuel Desoutter <sup>3,1</sup>, Guillaume Hulin <sup>4,5</sup>,  
Francois-Xavier Simon <sup>1</sup>, Bruno Vanwalscappel <sup>1</sup>, Christine Cercy <sup>1,3</sup>, Yves Crêteur <sup>1</sup>

<sup>1</sup> INRAP – Ministère de la Culture et de la Communication, M. de l’Enseignement Sup. et de la Recherche Sci.

<sup>2</sup> Laboratoire de géographie physique (LGP) – Université Panthéon-Sorbonne, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12, CNRS: UMR8591 – France

<sup>3</sup> Institut de Recherches Historiques du Septentrion (IRHiS) - UMR 8529 (IRHiS) – Université de Lille, CNRS- France

<sup>4</sup> INRAP – 16 rue du Général Leclerc 80400 Croix-Moligneaux, France

<sup>5</sup> Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols (METIS) – Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, Ecole Pratique des Hautes Etudes, CNRS : UMR7619 – France

Dans le cadre de l agrandissement du port de Dunkerque, plus de 170 hectares de la plaine maritime flamande ont été explorés (diagnostic archéologique, étude d archives, géophysique, sondages en puits). L intégration des différents résultats permet d aboutir à une compréhension du secteur probablement meilleure que ne l eut fait chaque discipline séparément.

Les premiers mètres de dépôts sont constitués de sables tidaux recoupés par des chenaux de marée. Les décimètres supérieurs sont éventuellement plus limoneux. Les données stratigraphiques permettent d interpréter la carte de conductivité électrique tandis que la cartographie géo- physique autorise une spatialisation des données ponctuelles. Une attention toute particulière a été portée au contenu en malacofaune. Avec les données archéologiques, l ensemble autorise une restitution de la fermeture de ce secteur de l estuaire et de la succession des implantations de l habitat. Les occupations les plus anciennes (10-12e siècle) sont présentes à l ouest de la zone, en association avec des doubles fossés structurants (endiguement ?) et d un schorre. Plus à l est, l estuaire encore largement ouvert est composé d un chenal en cours d envasement, d une zone haute sableuse parcourue de petits chenaux de marée dont certains subissent une intervention anthropique précoce (endiguement ?) datée du 9-12e siècle. Plus à l est encore, se trouve un estuaire actif. Au 13-15e siècle, l habitat se déplace ensuite au plus près du chenal envasé puis au-delà, toujours sous la protection d un double fossé (et de la digue associée probable). L axe estuarien le plus actif, en limite est de la zone explorée, sera ensuite réduit pour former le watergang actuel.

La cartographie de conductivité électrique a permis également de mettre en évidence des anomalies qui se sont révélées être de larges et profondes structures anthropiques (jusqu à environ 40 m de diamètre et plus de 5 mètres de profondeur, soit -2,5 m sous la cote zéro). Bien que nombreuses, ces structures peuvent passer facilement inaperçues en diagnostic archéologique. Trois structures ont été testées. Leur remplissage est variable mais présente comme points commun une étanchéification du fond et des parois par des mottes d argile. Ces structures sont interprétées comme des mares endiguées dont quelques exemples subsistent en Zélande (" hollestelle "). Elles permettaient de recueillir l eau douce et leur couronne de remblais en élévation s élevaient au-dessus des plus fortes marées.

**Mots-Clés:** Aa, estuaire, Holocène, Moyen Age, mare endiguée, géophysique

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: laurent.deschodt@inrap.fr

## Etaples " Opalopolis " : enregistrement sédimentaire et archéologique de la fin de l'holocène d'un vallon affluent de l'estuaire de la Canche et découverte d'un piège à poissons du Haut Moyen Age.

Laurent Deschodt <sup>\*ψ1,2</sup>, Blandine Lecomte-Schmitt <sup>1</sup>, Yann Lorin <sup>1</sup>

<sup>1</sup> INRAP – Ministère de la Culture et de la Communication, Ministère de l’Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique – France

<sup>2</sup> Laboratoire de géographie physique (LGP) – Université Panthéon-Sorbonne, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12, CNRS: UMR8591 – France

Un diagnostic archéologique a été réalisé en 2010 dans la partie aval d'un court vallon, aujourd'hui sec, affluent direct de rive droite de l'estuaire de la Canche, à proximité immédiate du site Néolithique moyen des " Sablins ", exploré en fouille programmée. L'exploration a été fait en sondage en puits, sur une partie du versant de regard est et dans le fond du vallon.

La craie a été observée sur le versant. A proximité du débouché dans l'estuaire, elle formait un petit escarpement. Dans un seul sondage, à la faveur d'un talweg fossilisé incisant le versant, une unité de sable bien trié et finement lité (dépôt d'estran ?) a été observée sous une formation de versant weichselienne chargée de silex. Elle peut être interprétée comme le témoin d'un haut niveau marin pléistocène (Eemien ?). Localement sur le versant, un paléosol avec présence de matériel lithique néolithique se développe sur un sable chargé de silex. Le niveau est a priori corrélable avec le gisement néolithique des Sablins.

Au nord du secteur sondé, le paléosol avec matériel néolithique se prolonge dans le fond de la vallée aux environs de 2 m d'altitude. Le paléosol est brutalement interrompu (érosion par un chenal de marée) et recouvert par un dépôt sableux estuaire ("sable lité inférieur") qui remanie des blocs de tourbe. Un autre paléosol se développe un peu en dessous de 4 m d'altitude sur l'ensemble du fond du vallon. Il contient du matériel gallo-romain. Ce second paléosol est interrompu par deux chenaux de marais dont l'un a érodé la base du versant. L'autre, plus central, a livré des blocs de craie et de silex, ainsi qu'une série de petits bois de section entières, travaillés (coupés en biseau), en partie écorcés et organisés (tressés). Un taxon de la famille des Fabacées (très probablement genêt du teinturier) est très majoritairement représenté. La nature de l'ouvrage (de type vannerie), sa présence dans un chenal de marée, son association à un dépôt grossié rapporté permet de l'interpréter comme un piège à poissons associé à un petit barrage. Une datation par radiocarbone le date sans ambiguïté du Haut Moyen Age (date calibrée à 2 sigma entre 676 et 870 ap. J.C.). Les chenaux de marais sont comblés par un dépôt estuaire (" sable et limon lités supérieurs ") qui recouvre également le paléosol avec matériel gallo-romain jusqu'à environ 3,5 m d'altitude.

Après le dernier dépôt estuaire franc médiéval, des colluvions (avec une influence marine très discrète ?) puis des remblais anthropiques récents continue d'exhausser le niveau du vallon jusqu'à 6 mètres d'altitude.

Le diagnostic de ce petit secteur illustre le potentiel de conservation tant géologique qu'archéologique de ces petites vallées dépourvues d'écoulement propre en contexte estuaire.

**Mots-Clés:** Canche, estuaire, Holocène, Néolithique, Haut Moyen Age, chenal de marée

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: laurent.deschodt@inrap.fr

## A geo-archaeological and micromorphological approach to Human Ecodynamics in the North Atlantic : modelling settlement patterns and the emergence of commercial fishing in Iceland, 9th- 13th centuries

Val Dufeu <sup>\*ψ</sup>

Scottish Geo-archaeology Environmental Services – Royaume-Uni

Understanding of Iceland's Norse settlements has been fuelled by the conventional narrative which has imposed its stricture on research: Iceland was colonized by Norse fleeing political conflicts and seeking lands for cultivation and livestock. Modelling of settlement patterns as a reflection of the economic activity of the inhabitants is demonstrable through the observation of the spatial organisation of both subsistence and non-subsistence strategies developed by the settlers. As any landscape is structured by spatial layout and the association of both ecosystems and soil occupation that are connected to it. The clearance of woodland for agricultural and fuel purposes by the settlers, together with intensive livestock grazing, left Iceland nearly bare of its wooded cover within a century of c. 870. This paper argues that Viking-age settlements in the Westfjords and North of Iceland were driven by the most available resource which was the sea and its inhabitants; there location and architectural remains show that these settlements were hierarchized according to their fishing economy. Following the '*longue durée*' approach, the causality between the exploitation of aquatic resources, settlement patterns and the development of cultural 'sea-water' scape(s) is examined since they all play a part in the economic activities developed by the Scandinavian settlers.

**Mots-Clés:** micromorphology, fishremains, geo, archaeologymodelling, multi, disciplinarityhollistic approach, environmental archives

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: valdufeu4@hotmail.com

## Mobilité à très longue distance des poteries au sein des premières communautés néolithiques (NW de la mer Méditerranée) : évidences pétrographiques et géochimiques

Marzia Gabriele <sup>1</sup>, Chrystele Verati <sup>\*2</sup>, Fabien Convertini <sup>3</sup>, Bernard Gratuze <sup>4</sup>, Suzanne Jacomet <sup>5</sup>, Didier Binder <sup>1</sup>, Giovanni Boschian <sup>6</sup>, Gilles Durrenmath <sup>1</sup>, Louise Gomart <sup>7</sup>, Jean Guilaine <sup>8</sup>, Jean Marc Lardeaux <sup>9</sup>, Claire Manen <sup>10</sup>

<sup>1</sup> Culture et Environnements, Préhistoire, Antiquité, Moyen-Age (CEPAM) - Université Nice Sophia Antipolis : UMR7264, CNRS: UMR7264 - France | <sup>2</sup> UMR Geoazur - Université de Nice Sophia-Antipolis : UMR7329 - France

<sup>3</sup> Laboratoire méditerranéen de préhistoire Europe-Afrique (LAMPEA) CNRS, INRAP, Ministère de la Culture et de la Communication, Aix Marseille Université - France | <sup>4</sup> Institut de Recherches sur les Archéomatériaux (IRAMAT) - Université de Technologie de Belfort-Montbeliard : UMR5060, Université d'Orléans : UMR5060, université Bordeaux Montaigne : UMR5060, CNRS: UMR5060 - France | <sup>5</sup> Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF) - MINES ParisTech - École nationale supérieure des mines de Paris, CNRS: UMR7264 - France | <sup>6</sup> Universita di Pisa (Dipartimento Di Biologia) - Italie | <sup>7</sup> Trajectoires - UMR 8215 - Université Panthéon-Sorbonne, CNRS: UMR8215 - France | <sup>8</sup> Collège de France (CDF)- France | <sup>9</sup> UMR Geoazur - Université de Nice Sophia-Antipolis - France

<sup>10</sup> Travaux et recherches archéologiques sur les cultures, les espaces et les sociétés (TRACES) - École des Hautes Études en Sciences Sociales, Université Toulouse - Jean Jaurès, Ministère de la Culture et de la Communication, INRAP, CNRS: UMR5608 - France

La Néolithisation de la Méditerranée nord-occidentale, opérée par des groupes d'agropasteurs, se réalise peu après 6000 BCE. Si une route méditerranéenne de colonisation peut être tracée à partir du style céramique Impressa depuis l'est de la Méditerranée en passant par l'Italie, l'arc Liguro-provençal, jusqu'en Languedoc méditerranéen, les modalités de cette diffusion sont au cœur des débats actuels dans la communauté des préhistoriens. L'examen de trois vases Impressa découverts sur deux sites très éloignés l'un de l'autre (Pont de Roque-Haute, Languedoc, France ; Le Secche, île de Giglio, Italie) apporte un nouvel éclairage sur les réseaux d'échange et de diffusion à l'œuvre dans ce contexte chrono-culturel.

L'étude pétrographique de ces récipients révèle en effet que les terres ayant servi à leur fabrication ne sont pas d'origines locales. Les compositions identifiées renferment des éléments volcaniques, tels que des sanidines et des pyroxènes, incompatibles avec les contextes géologiques du site de Pont de Roque-haute (volcanisme alcalin d'Agde sans sanidine) et du site de Le Secche (granite). Par ailleurs, les analyses géochimiques - analyses en majeurs (ICP-OES) et traces sur les céramiques (ICP-MS), MEB EDS et LA-ICP-MS (majeurs et traces) sur pyroxènes et sanidines contenus dans les céramiques - permettent d'identifier des proxys fiables à l'aide desquels nous pouvons conclure que les céramiques de Pont de Roque-Haute et de Le Secche ont été confectionnées à partir d'une même matière première.

Par la confrontation de nos données avec celles disponibles dans la littérature, nous montrons que les provinces volcaniques italiennes (Romaine, Toscane et Campanienne) sont les meilleures candidates pour produire des terres d'altération ayant une pétrologie et géochimie cohérentes vis-à-vis des minéraux observés dans les céramiques étudiées. Enfin, l'identification de proxys géochimiques fiables sur les monograins de pyroxènes (notamment Zr/Y, Ce/Y) nous permet de démontrer que les terres d'altération utilisées proviennent plus précisément de la province volcanique Romaine, réduisant ainsi les possibilités de localisation des zones d'approvisionnement des communautés néolithiques. Nous montrons ainsi qu'au cours de la première moitié du 6ème millénaire BCE des céramiques Impressa ont été transportées sur de très longues distances. Ceci confirme l'existence de réseaux de transfert des biens, déjà illustrés par la diffusion des obsidiennes de Palmarola, notamment sur les mêmes sites.



**Mots-Clés:** néolithisation, arc liguro, provençal, Languedoc méditerranéen, provinces volcaniques italiennes, céramique Impressa, géochimie, pétro, archéologie

## Magnétisme et Archéologie : l'apport des magnétomètres vectoriels pour la mesure haute résolution et en contextes à faible signal.

Bruno Gavazzi <sup>\*1</sup>, Munsch Marc <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut de physique du globe de Strasbourg (IPGS) - université de Strasbourg, CNRS : UMR7516 – 1 rue Blessig  
67084 STRASBOURG CEDEX, France

La mesure magnétique est aujourd’hui très courante en archéologie. Différentes méthodes et stratégies de mesure existent : gradiométrie ou champ total, magnétomètres scalaires ou vectoriels. Dans tous les cas de figure, une des limites de la méthode dépend du seuil de détection dépendant du matériel ainsi que de la stratégie de mesure mise en place. Afin de dépasser ces limites et d’offrir un spectre d’application plus large l’IPGS (UMR 7516) en partenariat avec ARCHIMEDE (UMR 7044) a mis au point un système de mesure adapté à l’archéologie à base de magnétomètres vectoriels. L’utilisation de ce type de magnétomètre permet une compensation des perturbations magnétiques générées par l’équipement, ce qui permet de mettre en place des dispositifs compacts ou la mesure est faite à haute densité (tous les 0.1m) au plus proche des sources. Il est ainsi possible de détecter des structures réputées non détectables en magnétométrie, tel des trous de poteaux. Additionnellement, ce type de dispositifs peut également être utilisé dans une configuration d’espacement et de distance au sol similaire à celle des prospections classiques. La mesures des composantes permettant ainsi d’obtenir des résultats plus résolutifs pour les faibles contrastes que ceux obtenus à l’aide de gradiomètres et ouvrant la porte à l’utilisation précise de transformées du signal issu de la théorie du potentiel. Ces résultats sont montrés à travers la théorie, le cas synthétique et plusieurs applications dans des contextes archéologiques et environnementaux différents.

**Mots-Clés:** Magnétisme, Fluxgate, haute résolution, détectabilité

<sup>\*</sup>Intervenant

## Calendrier de la diffusion du millet dans les Alpes déterminé par la première occurrence de miliacine dans les sédiments lacustres

Jérémy Jacob <sup>\*ψ1</sup>, Anaëlle Simonneau <sup>1</sup>, Franck Renaud <sup>1</sup>, Manon Bajard <sup>2</sup>, Erwan Messager <sup>2</sup>, Jérôme Poulenard <sup>2</sup>, Charline Giguet-Covex <sup>2</sup>, Fabien Arnaud <sup>2</sup>, Elise Doyen <sup>3</sup>, Pierre Sabatier <sup>2</sup>, David Etienne <sup>4</sup>, Emmanuel Malet <sup>2</sup>, Bernard Fanget <sup>2</sup>, Claude Lemilbeau <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO - UMR7327) – CNRS, Université d'Orléans, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

<sup>2</sup> Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne (EDYTEM) – Université Savoie Mont Blanc, CNRS: UMR5204 – France

<sup>3</sup> Institut national de recherches archéologiques préventives – INRAP – 38 Rue des Dats, 51520 Saint-Martin sur le Pré, France

<sup>4</sup> Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et Ecosystèmes Limniques (CARRTEL) – Université de Savoie, Institut national de la recherche agronomique (INRA) : UMR0042 – Campus scientifique, 73376 Le Bourget du Lac cedex, France

Le millet commun (*Panicum miliaceum*), est l'une des céréales de base de l'alimentation de la préhistoire, et notamment de l'âge du Bronze, en Europe. Distincte des céréales du Croissant Fertile (blé, orge, seigle...), elle aurait été domestiquée en Asie Centrale ou en Chine puis aurait progressivement diffusé vers l'ouest à la faveur d'échanges ou de mouvements de population. Le calendrier de cette diffusion, alimenté par les découvertes et datations sur de nombreux archéologiques, reste pourtant discuté. Détailler les routes de diffusion du millet permettrait pourtant d'affiner notre compréhension des routes d'échanges ou de migration à cette période. Nous avons analysé la miliacine, biomarqueur moléculaire du millet cultivé, dans les sédiments des Lac Lédro (Italie), Le Bourget, Paladru, Aiguebelette et La Thuile (France) pour préciser ces routes de diffusion de millet. La date de première occurrence de miliacine dans les sédiments du lac Lédro est déterminée autour de 2400 BC. Pour les lacs Le Bourget, Paladru, Aiguebelette et La Thuile, la date de première apparition est remarquablement synchrone, autour de 1500 BC. Ceci suppose une diffusion locale très rapide de la culture du millet. Alors que la présence de miliacine anté-1500 BC dans les sédiments du lac de La Thuile est imputable soit à une contamination au laboratoire, soit à la présence d'une autre source végétale de miliacine dans le bassin versant, un échantillon de sédiment du lac d'Aiguebelette daté du Néolithique final pourrait suggérer la présence du millet dès cette période dans la région.

Enfin, la comparaison des abondances de miliacine dans les sédiments du Lac du Bourget, de La Thuile et d'Aiguebelette permet d'émettre des hypothèses sur l'évolution des populations alpines à l'âge du Bronze, du Fer et à l'Antiquité, en lien éventuel avec les changements climatiques qui ont affecté ces époques.

**Mots-Clés:** Age du Bronze, millet, Alpes, sédiments lacustres, miliacine

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: jeremy.jacob@cnrs-orleans.fr

## 8000 ans d'occupation du sol en bordure de plaine alluviale : l'apport de l'archéologie environnementale (géoarchéologie et bioarchéologie), sur la fouille du Pouget à Lavérune (Languedoc, France)

Christophe Jorda <sup>\*ψ1,2</sup>, Sophie Martin <sup>1,2</sup>, Julia Wattez <sup>1,2,3</sup>, Isabel Figueiral <sup>1,4</sup>, Vianney Forest <sup>5,6</sup>, Isabelle Rémy <sup>1</sup>, Raphaëlle Guibert <sup>1,7</sup>, Jérôme Hernandez <sup>1,2</sup>, Muriel Gandelin <sup>1,6</sup>, Christophe Ranché <sup>1,6</sup>, Lionel Gourichon <sup>8</sup>

<sup>1</sup> Institut National de Recherches Archéologiques Préventives – INRAP – France | <sup>2</sup> Archéologie des Sociétés Méditerranéennes (ASM) – CNRS: UMR5140, Université Paul-Valéry - Montpellier 3, Ministère de la Culture et de la Communication – France | <sup>3</sup> DMOS, Agroparistech – AgroParisTech, INRA - Université Paris-Saclay – France | <sup>4</sup> Centre de Bio-Archéologie et déécologie (CBAE) – Université Montpellier 2 - Sciences et Techniques, Ecole Pratique des Hautes Etudes, CNRS: UMR5059 – France | <sup>5</sup> INRAP-Méditerranée, TRACES-UMR5068-Toulouse – INRAP : Méditerranée – France | <sup>6</sup> Travaux et recherches archéologiques sur les cultures, les espaces et les sociétés (TRACES) – École des Hautes Études en Sciences Sociales, Université Toulouse - Jean Jaurès, Ministère de la Culture et de la Communication, Institut national de recherches archéologiques préventives, CNRS: UMR5608 | <sup>7</sup> ARCHEORIENT - Environnements et sociétés de l'Orient ancien (Archéorient) – Université Luière - Lyon 2, CNRS: UMR5133 – France | <sup>8</sup> Université Côte d'Azur, CNRS, CEPAM (UMR 7264), Nice (CEPAM) – Université Côte d'Azur (UCA), CNRS : UMR7264

La géomorphologie a, de manière générale, pour objet la description et l'explication des formes du relief terrestre dans une vision diachronique, alors que, dans le cadre de la géoarchéologie, elle devient un outil de l'archéologie. Les sédiments sont dès lors considérés comme des géofacts enregistrant l'empreinte des occupations humaines, à l'instar de la micromorphologie. En effet, si la géomorphologie et, pour le volet biologique, la paléoécologie permettent de comprendre l'évolution des milieux, la géoarchéologie et la bioarchéologie (malacologie, anthracologie, archéozoologie...) ont, elles, pour objectif de mettre en évidence les modes d'occupation des populations, c'est à dire les relations que ces dernières entretiennent avec leurs lieux de vie que ce soit au niveau de leur territoire, de leur terroir ou de leur habitat. On parle alors d'archéologie environnementale. Le site du Pouget à Lavérune en est un bon exemple. Il est implanté dans une vaste plaine alluviale, sur une légère éminence entre le fleuve de la Mosson et un de ses affluents. La fouille a révélé des occupations humaines se succédant depuis le Mésolithique jusqu'à la période historique, en bordure de plaine d'inondation. Ayant travaillé de concert, les disciplines de l'archéologie environnementale donnent l'image d'une zone intensément occupée dès le Mésolithique. Des boisements sont mis en évidence, mais le paysage local est déjà largement ouvert, tandis que des habitats sont identifiés, associés à de nombreux restes de consommation. Du point de vue pédosédimentaire, le site du Pouget correspond à un secteur soumis à des débordements fins mais réguliers, alimenté par des colluvionnements et où la pédogenèse est continue. Au Néolithique ancien, seules quelques fosses isolées sont identifiées, alors que les sols d'occupation sont nettement marqués par des piétingements. Les données géo- et bioarchéologiques font état d'une végétation de broussailles et prairies humides pâturées. Au Néolithique moyen, les occupations mises au jour correspondent à quelques fosses de rejets et des foyers. Les prairies humides sont toujours présentes traduisant là encore des espaces pâturés ; cependant la part des pelouses sèches et des milieux rudéro-culturaux augmente, renvoyant l'image d'une agriculture en développement. Pour l'Âge du bronze, des fosses, foyers et des maisons sont identifiés, dans un environnement où les pelouses sèches pâturées et les milieux cultivés augmentent encore. Au cours de l'Antiquité et du Moyen-Âge, le secteur est densément occupé (voie, nécropole, vignobles, fossés...). Les résultats obtenus font ressortir le schéma classique d'une augmentation de la pression anthropique au cours du temps. Ici pourtant, et malgré l'indigence des vestiges pour certaines périodes, les données de l'archéologie environnementale montrent la précocité et la permanence de cette emprise des populations sur leur territoire, alors même que les structures archéologiques, parfois diffuses ne le laissaient pas supposer.

**Mots-Clés:** géoarchéologie, bioarchéologie, anthropisation, plaine alluviale, archéologie environnementale



<sup>\*</sup>Intervenant : <sup>\*\*</sup>Auteur correspondant: christophe.jorda@inrap.fr

## Enregistrement des activités humaines et impacts sur les transferts sédimentaires en contexte de plateaux / vallées calcaires : la forêt du Val Suzon sur le temps long.

Rémi Landois <sup>\*1</sup>, Amélie Quiquerezb <sup>φ1</sup>, Jean-Pierre Garciaab <sup>§1</sup>

<sup>1</sup> Archéologie, Terre, Histoire, Sociétés [Dijon] (ARTEHiS) – Ministère de la Culture et de la Communication,  
Université de Bourgogne, CNRS: UMR6298 - France

A travers une approche pluridisciplinaire, combinant histoire, archéologie et sciences de l'environnement, cette étude vise à comprendre comment un territoire actuellement forestier (la forêt du Val Suzon située près de Dijon en Bourgogne) a été façonné et exploité à travers le temps et quels sont les héritages des pratiques anciennes sur la forêt actuelle. L'emprise de notre étude correspond à celle d'un important massif forestier installé sur des plateaux calcaires, incisés de nombreuses combes et bordant la vallée étroite du Suzon. L'analyse de données LiDAR, acquises sur l'ensemble du territoire en 2013, a permis d'identifier de nombreuses traces d'occupations et d'activités humaines d'âges différents, aujourd'hui conservées sous forêt. Certaines structures nous renseignent ainsi sur l'évolution du paysage sur le temps long, depuis le Néolithique jusqu'à la forêt actuelle. En parallèle, des travaux complémentaires sont venus enrichir nos connaissances sur l'histoire du Val Suzon : recherches archivistiques, sondages archéologiques, etc.

Dans le cadre de cette étude en particulier, nous nous sommes intéressés aux comblements sédimentaires de différentes combes dans le but d'analyser les transferts sédimentaires depuis le plateau vers la vallée alluviale, et leurs liens avec les occupations humaines anciennes. Des prospections géophysiques nous ont permis de connaître la morphologie des sédiments déposés dans ces vallées sèches. Nous avons également étudié la nature de ces sédiments grâce à plusieurs sondages. Ces derniers ont notamment révélé, au sein des colluvions, des couches riches en charbons de bois qui marquent des épisodes de défrichements ayant pris place sur les versants et les plateaux voisins. Ces résultats ont pu être comparés aux données archéologiques disponibles.

Enfin, notre réflexion s'est portée plus généralement sur l'enregistrement des activités anthropiques dans les archives sédimentaires et sur les facteurs contrôlant l'érosion sur les plateaux et la sédimentation dans et par les combes. Il est possible de s'interroger sur l'impact à long terme des activités agropastorales anciennes sur les sols, et sur les conséquences pour le milieu forestier actuel. Ces résultats s'intègrent dans un projet de recherche large sur l'histoire et l'environnement de la forêt du Val Suzon et contribuent par ailleurs à un travail doctoral réalisé par Rémi Landois, sous la direction de Jean-Pierre Garcia et Corinne Beck, au sein de l'UMR 6298 ARTEHIS.

**Mots-Clés:** Archéologie forestière, Sédimentologie, Bourgogne

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: remi.landois@u-bourgogne.fr

## Anthropisation d'un versant de basse montagne à Epagny (74) à la fin de l'âge du Bronze : apports de la micromorphologie couplée aux projections altimétriques des structures archéologiques.

Geoffrey Leblé <sup>\*ψ1</sup>, Annabelle Dufournet <sup>φ2</sup>

<sup>1</sup> Géoarchéologue - Archeodunum - France

<sup>2</sup> Archéologue (DPARC) - Pôle de recherche archéologique - Nantes Métropole - France

L'intervention archéologique menée sur la commune d'Epagny à l'été 2015 au lieu-dit "Plafète" a permis de sonder une superficie de 3 000 m<sup>2</sup>. La surface décapée présente une forte pente nord-ouest/sud-est au sein de laquelle les installations ont été reconnues. La fouille a mis en évidence deux horizons de l'âge du Bronze. D'une part, des vestiges concentrés dans la partie septentrionale de l'emprise évoquent une occupation de l'étape initiale du Bronze final. D'autre part, la nature des vestiges et le lot céramique (coupes, jarres, gobelets) témoignent d'une occupation à vocation domestique au cours de l'âge du Bronze final IIIB. La position au pied d'un versant abrupt fait du site un *locus* d'accumulation sédimentaire propice à la conservation de vestiges archéologiques. La concentration des ruissellements aux abords de la parcelle investiguée (dans une petite cuvette à l'ouest du site) participe à limiter l'érosion des horizons supérieurs. L'observation macroscopique et microscopique des coupes a permis de distinguer les horizons qui composent ce sol cumulique. Cette méthode, couplée à la projection altimétrique des structures archéologiques en différents transects, a abouti à une meilleure compréhension de la paléotopographie du versant et de la taphonomie des vestiges. Certains traits microscopiques se rapportent directement à l'occupation anthropique du versant (pâturage, paléoincendie), et attestent de l'aménagement du versant. La probabilité d'une installation en terrasse est confortée.

**Mots-Clés:** lame mince, paléotopographie, terrasse, paléoincendie

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: g.leble@archeodunum.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: Annabelle.DUFOURNET@nantesmetropole.fr

## Vers l'élaboration et le partage d'un thésaurus et d'un schéma conceptuel de données de matériauthèque

Matthieu Lebon <sup>\*ψ1</sup>, Antoine Pasqualini <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Histoire naturelle de l'Homme préhistorique (HNHP) – Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN), CNRS-CNRS (France) : UMR7194, Université de Perignan Via Domitia – France

<sup>2</sup> Culture et Environnements, Préhistoire, Antiquité, Moyen-Age (CEPAM) – Université Nice Sophia Antipolis, CNRS: UMR7264 – France

Le réseau CAIRN (Compétences Archéométriques Interdisciplinaire – Réseau National) de la mission pour l'interdisciplinarité du CNRS a mis en place depuis deux ans un Groupe de Travail sur les " Bases de données et référentiels ". Plusieurs journées organisées sur ce thème ont mis en évidence, au sein du réseau, des difficultés pour la mise en place et le partage de bases de données. Ces difficultés sont renforcées par le caractère interdisciplinaire de nos études, nécessitant l'emprunt, l'adaptation et l'utilisation de caractères descriptifs relevant de différents champs disciplinaires, notamment celui des géosciences, et qui pour le moment ne sont pas suffisamment normalisés et standardisés. C'est le cas dans le domaine des matériauthèques, objets d'études archéométriques, et de leurs systèmes descriptifs. Nous avons ainsi décidé d'initier un projet pilote visant à la définition d'un thésaurus et d'un schéma conceptuel de base de données propres aux matériauthèques qui aideront à lever les difficultés mentionnées et qui pourront être partagés entre les membres du réseau CAIRN. Ce travail collaboratif, associant une quinzaine de personnes impliquées dans la gestion et la mise en place de ce type d'outil, a débuté au premier semestre 2018. Il a dans un premier temps visé à identifier l'existant pouvant servir de base ou alimenter la définition des caractéristiques communes et indispensables à l'établissement d'un thésaurus spécifique et d'un schéma conceptuel de base de données associés. L'objectif de cette présentation est d'exposer les motivations de cette action, d'informer la communauté des archéomètres de l'avancée des travaux, notamment en ce qui concerne les contraintes rencontrées et les solutions techniques choisies, et de recueillir les commentaires et propositions des participants à la session.

**Mots-Clés:** Matériauthèque, Base de données, Thésaurus

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: matthieu.lebon@mnhn.fr

## Trois millénaires d'impact anthropique sur les sols et le système morpho-sédimentaire de la Narse de la Sauvetat (Auvergne, Fr.) du Néolithique au Moyen Âge

Alfredo Mayoral <sup>\*ψ1</sup>, Salomé Granai <sup>2,3</sup>, Anne-Lise Develle <sup>4</sup>, Jean-François Berger <sup>5</sup>, Jean-Luc Peiry <sup>1,6</sup>, Franck Vautier <sup>7</sup>, Yannick Miras <sup>8</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Géographie Physique et Environnementale (GEOLAB) – CNRS: UMR6042, Université Clermont Auvergne, CNRS: UMR6042 – France

<sup>2</sup> Géoarchéon - GéoArchÉon SARL – France et Laboratoire de géographie physique (LGP) – Université Panthéon-Sorbonne, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12, CNRS: UMR8591 – France

<sup>4</sup> Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne (EDYTEM) – CNRS : UMR5204, Université de Savoie

<sup>5</sup> Environnement Ville Société (EVS) – Université Lumière - Lyon II, CNRS : UMR5600 – France

<sup>6</sup> Environnement, Santé, Sociétés (ESS) – CNRS: UMI3189, CNRS: UMI3189 – France

<sup>7</sup> Maison des Sciences de l'Homme de Clermont-Ferrand (MSH Clermont) – CNRS : USR3550 – France

<sup>8</sup> Histoire naturelle de l'Homme préhistorique – MNHN, Université de Perpignan Via Domitia, CNRS: UMR7194

L'Holocène récent se caractérise en Europe occidentale par l'émergence de l'impact des sociétés sur les systèmes naturels. L'identification des rythmes et des seuils du forçage anthropique progressif des milieux, et plus spécifiquement des sols et des systèmes morpho-sédimentaires, est un enjeu majeur de la recherche géoarchéologique. En Limagne d'Auvergne, la faible précision chronologique des études à longtemps interdit la caractérisation fine des interactions socio-environnementales sur le long terme, et donc la discussion de la causalité et du poids des facteurs climatiques et sociétaux dans ce forçage.

Ce travail s'appuie sur l'étude de trois carottes sédimentaires extraites dans la Narse de la Sauvetat. Il s'agit d'une dépression hydromorphe située à proximité du site de Corent occupé depuis le Néolithique. Datées au radiocarbone, elles ont fait l'objet d'analyses géoarchéologiques et paléoenvironnementales multi-proxys (sédimentologie, géochimie, micromorphologie, malacologie). Elles ont permis de caractériser avec une haute résolution chronologique l'intensité et la source du détritisme, l'évolution des conditions pédologiques et hydrologiques, l'ouverture paysagère et l'activité anthropique (feux, pollutions) entre 3000 cal BC et 700 cal AD. L'impact des sociétés sur le paysage est sensible dès la fin du Néolithique. Durant l'âge du Bronze ancien et moyen, les dynamiques hydrosédimentaires ont été violentes et rythmées par les péjorations climatiques de 4.2 et 3.5 ka BP, que l'on a caractérisées pour la première fois en Limagne. Au Bronze final une exploitation du milieu, peut-être pastorale, s'est développée marquant le début de l'érosion des sols du bassin versant. Au milieu du VIIe s. cal BC, un seuil majeur d'impact anthropique sur les sols et les processus érosifs a été franchi : la cuvette fut probablement drainée et mise en culture, alors que l'érosion des versants devenait très forte. Ce forçage du système morpho-sédimentaire s'est accentué pendant le deuxième âge du Fer et la période romaine, mais les impacts sur les sols et les flux hydro-sédimentaires semblent avoir été mitigés par une maîtrise et un aménagement importants du milieu. L'entrée dans le Moyen Âge fut marquée par une dégradation subite du drainage sans doute en lien avec un changement du mode d'exploitation du terroir. Elle causa une paludification de la cuvette qui devint lacustre au tournant du VIe s. cal AD.

**Mots-Clés:** Géoarchéologie, Géomorphologie, Impact anthropique, Erosion des sols, Limagne, Holocène

## Des reconstitutions paléoenvironementales aux dynamiques d'occupation : modélisation des interactions hommes-littoral en basse vallée de la Canche (Pas-de-Calais) au travers d'un SIG

Murielle Meurisse-Fort <sup>\*ψ1</sup>, Inès Leroy <sup>\*φ2</sup>

<sup>1</sup> Conseil départemental du Pas-de-Calais, Direction de l'Archéologie, Hôtel du Département, FR-62018 ARRAS cedex 9 et UMR 8164 HALMA CNRS/Univ. Lille SHS/MCC - Université Charles de Gaulle - Lille III : UMR8164 Halma - France

<sup>2</sup> UCL-CRAN, Avenue du Marathon, 3, B - 1348 Louvain-la-Neuve - Belgique

La reconstitution des paysages constitue un outil puissant pour déceler les interactions Homme-Milieu. Cette démarche se nourrit d'une documentation variée, combinant les études paléoenvironementales, archéologiques et historiques.

L'analyse conjointe d'un premier jeu de données archéo-historiques (I. Leroy) et géomorphologiques (M. Meurisse-Fort) en basse Canche a été conduite dès 2008 autour de l'emplacement présumé du *portus* Quentovic, s'inscrivant parallèlement à des travaux menés sur le littoral du Nord de la France. à l'échelle régionale, celles-ci les ont recensées et intégrées dans une synthèse paléoenvironementale. à l'échelle du site, elles ont contribué à caractériser l'occupation et le mode de vie des populations de l'établissement mérovingien et carolingien. Au centre des réflexions communes, le contexte topographique, la praticabilité, la viabilité et l'approvisionnement en ressources variées du site d'accueil ont éclairé sur la localisation des implantations.

Ce travail à double échelle mobilise des données soit anciennement acquises et nécessitant une actualisation critique de leur interprétation, soit issues d'opérations archéologiques et de recherches récentes. Actuellement, deux projets collectifs de recherche s'y attachent simultanément et conjointement : "ArchGeol" et "Quentovic : un port du haut Moyen Âge entre Ponthieu et Boulonnais". Le PCR ArchGeol s'intéresse ainsi aux interactions entre l'homme et son environnement à l'échelle des systèmes littoraux et fluviaux de la Mer du Nord et de la Manche (plaine maritime flamande - nord de la Somme). Il vise à comprendre les modalités des installations humaines et leur évolution depuis le Néolithique jusqu'à la fin de la période médiévale, tout en replaçant ces occupations dans un contexte paléoenvironemental progressivement modélisé. Le PCR Quentovic s'attache notamment à la définition de l'environnement contemporain du *portus* éponyme et aux interactions homme-milieu qui définissent les conditions de vie et d'occupation de ce site. Le développement de la base de données ArchGeol à l'architecture flexible permet de mutualiser et synthétiser les données pluridisciplinaires collectées, en dépassant les contraintes liées à chaque discipline ou période culturelle traitée. L'interface cartographique associée aux deux projets permet une spatialisation des informations, conformément aux besoins complémentaires de chaque spécialiste.

**Mots-Clés:** géoarchéologie, géohistoire, paléoenvironement, interactions Homme, Milieu

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: meurisse.fort.murielle@pasdecalais.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: ines.leroy@uclouvain.be

## Momies humaines d'Egypte Antique : analyse de leurs baumes de momification

Elodie Mezzatesta

Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale (IMBE) - CNRS: UMR7263, IRD UMR237:  
Aix Marseille Université : Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse : France

Une collection égyptienne, de 28 momies et 45 têtes de momies, conservée au musée des Confluences à Lyon, n'a jamais été étudiée. Le labex scientifique nommé ARCHIMEDE (Archéologie et Histoire de la Méditerranée et de l'Egypte Ancienne) mené par une équipe de recherche interdisciplinaire, se propose de déterminer l'évolution de la momification à travers l'étude de ces défunt. Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une thèse ayant pour but de caractériser et d'identifier la nature des éléments chimiques des baumes de momification à l'aide de différentes techniques analytiques.

Une grande variété de substances naturelles peut être employée lors de la formulation des baumes, notamment des huiles végétales ou des graisses animales, des résines di- ou triterpéniques, du bitume ou bien encore de la cire d'abeille. Etant donné la richesse moléculaire de ces matériaux, leur identification au sein d'un échantillon archéologique représente un réel challenge scientifique. Leur stabilité chimique les rend particulièrement intéressants lors de l'analyse de prélèvements archéologiques de nature organique. Pour réaliser un tel travail, il est nécessaire d'employer différentes techniques analytiques, chacune apportant des éléments complémentaires, telles que l'Infrarouge à Transformée de Fourier (IR-TF) et la Chromatographie en Phase Gazeuse couplée à un Spectromètre de Masse (CPG-SM).

La spectroscopie par infrarouge est une technique de choix pour cette étude car elle est rapide et efficace pour identifier les diverses familles chimiques présentes. La chromatographie en phase gazeuse permet, quant à elle, de séparer les différents constituants biochimiques définissant avec un haut degré de certitude leur origine naturelle. Cependant, ces substances peuvent s'oxyder, se dégrader, s'altérer, naturellement avec le temps (vieillissement) ou sous l'effet de facteurs anthropiques, comme une action thermique. Les molécules dégradées peuvent alors jouer un rôle important dans l'identification d'une espèce ou de la technique de formulation.

En ce qui concerne la méthodologie expérimentale, dans un premier temps des analyses par IR-TF ont été accompagnées d'un traitement statistique des données par Classification Ascendante Hiérarchisée (CAH) pour réaliser un premier tri des 61 échantillons étudiés et ainsi les regrouper sous la forme de clusters. Suite à cela, une étude globale a été réalisée par CPG-SM, avec une préparation minimale des échantillons, des protocoles d'extraction simples et des temps d'analyses réduits. Ces analyses complémentaires ont permis de confirmer les résultats issus de la spectroscopie infrarouge. Cependant afin d'affiner ces derniers, un protocole plus sélectif par Extraction en Phase Solide (SPE) a été mis au point, permettant de séparer, purifier et concentrer les différentes familles chimiques constituant les baumes, rendant leur détection et leur caractérisation moléculaire plus précises en CPG-SM.

**Mots-Clés:** Baumes, momies humaines, Ancienne Egypte, caractérisation chimique, IR, TF, CPG, SM

## Première datation uranium-plomb (U-Pb) en Europe sur l'un des plus vieux sites préhistoriques de France : la grotte du Vallonnet

Veronique Michel <sup>\*1,2</sup>, Chuan-Chou Shen <sup>3</sup>, Jon Woodhead <sup>4</sup>, Hsun-Ming Hu <sup>3</sup>, Chung-Che Wu <sup>3</sup>, Pierre Elie Mouillé <sup>5</sup>, Samir Khatib <sup>6</sup>, Dominique Cauche <sup>7</sup>, Marie-Hélène Moncel <sup>8</sup>, Patricia Valensi <sup>8,9</sup>, Yu-Min Chou <sup>10</sup>, Sylvain Gallet <sup>11</sup>, Anna Echassoux <sup>12</sup>, Chrystèle Vérati <sup>\*11</sup>, François Orange <sup>13</sup>, Henry De Lumley <sup>14</sup>

<sup>1</sup> CEPAM – Université Côte d’Azur, CEPAM : UMR7264 – France | <sup>2</sup> GEOAZUR – Université Côte d’Azur, CNRS : UMR7239, Observatoire de la Côte d’Azur – France | <sup>3</sup> National Taiwan University (HISPEC) – Taïwan

<sup>4</sup> School of Earth Sciences, University of Melbourne (Isotope Geochemistry) – Australie | <sup>5</sup> Musée de Préhistoire Régional de Menton – Ville de Menton – France | <sup>6</sup> Institut de Paléontologie Humaine (IPH) – Institut de Paléontologie Humaine – France | <sup>7</sup> Laboratoire de Préhistoire Nice côte d’Azur – Institut de Paléontologie Humaine – France | <sup>8</sup> HNHP (Département de Préhistoire, MNHN) –CNRS : UMR7194, France | <sup>9</sup> Musée de Préhistoire de Tourrette-Levens (SEPP) – HNHP – France | <sup>10</sup> Southern University of Science and Technology Shenzhen, China – Chine | <sup>11</sup> Université Côte d’Azur, CNRS, OCA, IRD, Géoazur, 06560 Valbonne, France. – Géoazur, Université de Nice Sophia-Antipolis – France | <sup>12</sup> Réserve de biosphère – Réserve de biosphère de Fontainebleau et du Gâtinais – France | <sup>13</sup> CCMA – Université Côte d’Azur (UCA) – France

<sup>1</sup> Institut de Paléontologie Humaine, Muséum National d’Histoire Naturelle, 1 rue René Panhard, 75013 Paris Fr

Les premières migrations humaines hors d’Afrique représentent un évènement majeur dans l’histoire de l’humanité. Aux portes de l’Europe, les plus anciens hominins sont enregistrés en Géorgie à 1,8 million d’années (Garcia et al., 2010) à Dmanisi. Cependant la carte de leur migration à travers le continent européen reste incomplète. La grotte du Vallonnet (Alpes- Maritimes, France) est un des plus vieux sites préhistoriques d’Europe ayant livré des traces d’activité humaine : des outils lithiques et des traces de découpe sur des os d’animaux. Il s’agit d’une petite caverne de quelques mètres carrés comprenant un remplissage archéologique de 1,5 m d’épaisseur. La grotte était occupée alternativement par des carnivores de grande taille tels que la hyène géante, l’ours des cavernes, le tigre à dents de sabre, la panthère qui s’en servaient de repaire ou de tanière et par des hominins qui s’en servaient de bivouac. Ces derniers y ont laissé une industrie archaïque composée principalement de galets aménagés et d’éclats. Ils ont charogné les carcasses des grands herbivores (*Bison schoetensacki*, *Praemegaceros* cf. *verticornis*, *Pseudodama nestii vallonnetensis*) abandonnées par les carnivores. Le paysage, très découvert, était occupé par une steppe faiblement arborée, parsemée de pins et d’essences méditerranéennes. La méthode uranium-plomb (U-Pb), par spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif est ici utilisée pour la première fois pour dater un site préhistorique en Europe. Les analyses, réalisées par les laboratoires " Isotope Geochemistry " à Melbourne et " HISPEC " à Taipei, ont permis de dater de manière très précise, à la lumière des dernières avancées technologiques, la calcite des formations stalagmitiques de la grotte. En effet, les progrès récents de la méthode U-Pb ont ainsi permis de dater les stalagmites trop anciennes pour l’application de la méthode uranium-thorium (U-Th, jusqu’à 600 ka) et relativement " jeunes " pour l’application de la méthode U-Pb car la calcite du site contient une teneur en Pb extrêmement faible (de l’ordre du ppb). Les niveaux archéologiques étant intercalés entre deux de ces formations stalagmitiques composées de calcite pure et bien cristallisée, la datation U-Pb leur attribue ainsi un âge de 1,2- 1,1 Ma. Le site du Vallonnet est contemporain des sites préhistoriques de la Sima del Elefante en Espagne daté à ~1,2 Ma par la méthode des cosmogéniques (Al/Be) (Carbonell et al., 2008) et de Bois-de Riquet (Lézignan-La-Cèbe) en France daté par la biochronologie entre 1,1 et 1,3 Ma (Bourguignon et al., 2016). Les résultats de notre étude sont en accord d’un point de vue chronologique avec les données du paléomagnétisme et de la biochronologie, et permettent ainsi d'affiner la carte de répartition des plus anciens sites préhistoriques d’Europe.



**Mots-Clés:** U, Pb, datation, Paléolithique inférieur, Epivillafranchien, Homininés, calcite, Europe, Archéologie

## « Archéomatériaux, territoires, patrimoines » (ATP) : un projet transdisciplinaire sur les matériaux anciens en Haute Normandie

Damase Mouralis <sup>\*1</sup>, Yves-Marie Adrian, Daniel Ballesteros, Armelle Couillet, François Delisle, Marion Le Texier, Dagmar Lukas, Sylvain Mazet, Carole Nehme, Aude Painchault, Sébastien Rey-Coyrehourcq, Sophie De Ruffray, Dominique Todisco, Mariacristina Varano, Laurent Vercouter

<sup>1</sup> IDEES - Normandie Univ, UNIROUEN, CNRS : UMR6266 - 7 rue Thomas Becket, 76130 Mont-Saint-Aignan, France

Les archéomatériaux sont les matières premières précocement utilisées par les populations anciennes pour la fabrication d'objets quotidiens ou de prestige, ou encore pour la construction. Dans de nombreux cas, ces matériaux ont été transportés et employés à des distances variables des sources où ils sont naturellement présents. Cette diffusion spatiale des matériaux et des objets dont ils sont issus témoigne à la fois de la mobilité des matières premières et des objets, mais aussi des populations et des techniques. A toutes les époques, le choix préférentiel de certaines sources traduit l'importance relative d'une multitude de facteurs comme la qualité et le coût des matériaux, la distance de transport, les relations sociales et politiques ou encore le projet technologique. Pour ces raisons, le choix des sites d'approvisionnement (ou carrières) et les routes empruntées témoignent d'une structuration continue et renouvelée des territoires.

Dans ce contexte, ce travail présente les objectifs et les premiers résultats du projet "ATP" qui porte sur l'argile et la craie, étudiées de manière transdisciplinaire, au cours de deux fenêtres chronologiques, l'Antiquité et le Moyen-Âge.

Pour chacun de ces archéomatériaux, le projet vise à :

- Étudier leurs usages archéologiques, à travers l'analyse de toute la chaîne opératoire. Des bases de données d'édifices médiévaux et d'ensembles céramiques sont constituées, en croisant sources écrites et sources matérielles, pour mettre en évidence leur diffusion en Normandie orientale ;

- Caractériser les matériaux (pétrographie, minéralogie, géochimie, pétrophysique) afin de définir les facteurs rendant compte de leur exploitation préférentielle. Pour la craie, les premiers résultats permettent ainsi d'identifier les roches du Turonien au Campanien (Crétacé Supérieur) préférentiellement exploités (cf. la carrière de Caumont) ;

- Proposer, pour chacun des matériaux étudiés, un modèle conceptuel précisant les lieux, les acteurs et les relations qui les lient ainsi que les éléments de contexte spatiale et historique. Il s'agit ensuite de réaliser une simulation informatique rendant compte du choix des sources et des modalités de diffusion spatial des matériaux.

Pour ces deux archéomatériaux, le projet ATP vise donc à reconstituer aussi bien des cheminements (routes empruntées, réseaux) depuis les sources jusqu'aux lieux d'utilisation, que des espaces exploités (zones de chalandises) définissant ainsi une structuration précoce du territoire.

**Mots-Clés:** archéomatériaux, argile, céramique, Antiquité, caractérisation physico-chimique, craie, archéologie du bâti, Moyen Âge, Normandie, modélisation, simulation spatiale

## The earthen architecture as a witness of the Neolithic cultural organization: the case of the PPNA site of Klimonas in Cyprus

Pantelitsa Mylona <sup>\*1</sup>, Julia Wattez <sup>\*2</sup>, Jean-Denis Vigne <sup>3</sup>

<sup>1</sup> UMR 7209 "Archéozoologie, archéobotanique : sociétés, pratiques et environnements » CNRS – Muséum national d'histoire naturelle (UMR 7209- MNHN- CNRS) – France

<sup>2</sup> INRAP (UMR 5140 "Archéologie des Sociétés Méditerranéennes") – France

<sup>3</sup> UMR 7209 "Archéozoologie, Archéobotanique: Sociétés, Pratiques, Environnement" - CNRS- Muséum National d'Histoire Naturelle (UMR 7209- MNHN- CNRS) – France

The recent excavations at the site of Klimonas (2011-2016) in the south of Cyprus revealed a Neolithic village constructed by earthen materials. A circular building (Structure 10) with a diameter of 10m, partially dug into the natural bedrock, was excavated. This building has a collective character in parallel with the PPNA communal buildings of Near East. Due to the importance of the site in the Neolithic context and the exclusive use of earthen materials a geoarchaeological study was applied using soil micromorphology. It aims to understand the construction technique used for this building and to test in which extent the earthen construction can record the cultural aspect of the human behavior through the construction techniques and the use of space of a Neolithic communal building.

**Mots-Clés:** geoarchaeology, Neolithic period, Cyprus

<sup>\*</sup>Intervenant

## Géoarchéologie de "l'habiter néolithique" : approche palethnographique des enregistrements sédimentaires

Marylise Onfray <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Trajectoires - UMR 8215 – CNRS : UMR8215 – France

<sup>2</sup> Ecologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes (ECOSYS) – Institut National de la Recherche Agronomique : UMR1402, AgroParisTech – France

Les récentes études géoarchéologiques menées sur des sites peu stratifiés à concentration de mobilier ont permis d'identifier et de caractériser dans le nord de la France, pour la première fois, le sol néolithique. Elles ouvrent alors de nouvelles perspectives pour la compréhension de l'espace habité par les communautés sédentaires agro-pastorales. En région Centre-Val de Loire où les habitats de la fin du Néolithique étaient seulement connus par quelques rares plans de bâtiments basés sur la répartition des structures en creux, ces résultats conduisent à reconsidérer ces sites qui, malgré leur nombre, restaient jusque-là délaissés. La diversité des sols résulte d'activités pratiquées à l'intérieur ou à l'extérieur de bâtiments et reflète alors des espaces aux fonctions distinctes. En prenant appui sur l'approche palethnographique développée par les préhistoriens sur les campements des sociétés chasseurs-cueilleurs à partir de la répartition des vestiges ainsi que sur les concepts portés par les géographes et les anthropologues autour de la question de l'habiter et l'habitat, il est maintenant possible d'engager une étude palethnographique de l'habitat néolithique basée sur la lecture des enregistrements sédimentaires. Fondées sur une analyse spatiale où des prélèvements en bloc orientés sont réalisés à l'intérieur, à proximité et éloigné des concentrations de mobilier, les analyses micromorphologiques visent à distinguer les limites fixes (mur, cloison, palissade) et semi-fixes (structures de combustion, de stockage) qui ont été posées et à identifier un ou des espaces dans lesquels s'établit un système d'activité. La reconstitution de l'histoire fonctionnelle de l'habitat rural de la fin du Néolithique des Grands Noyers à Gas illustre cette nouvelle voie de la recherche géoarchéologique portée sur les manières d'habiter l'espace.

**Mots-Clés:** Habitat, Sol, Néolithique, Géoarchéologie, Micromorphologie des sols

<sup>#</sup>Auteur correspondant: onfray.marylise@live.fr

## Les communautés agro-pastorales des plaines languedociennes du III millénaire av. n. è. : approche géoarchéologique socioculturel de l'organisation villageoise

Alessandro Peinetti <sup>\*1,2</sup>, Julia Wattez <sup>3,4</sup>, Luc Jallot <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Università di Bologna (UNIBO) - Italie

<sup>2</sup> Archéologie des Sociétés Méditerranéennes (ASM) - CNRS: UMR5140, Université Paul-Valéry - Ministère de la Culture et de la Communication - Route de Mende - MONTPELLIER Cedex, France

<sup>3</sup> UMR 5041, Archéologie des sociétés méditerranéennes - France

<sup>4</sup> Institut National de Recherches Archéologiques Préventives - INRAP - France

<sup>5</sup> UMR 5140 - ASM - CNRS : UMR5140, Université Paul Valéry - Montpellier III, Ministère de la Culture et de la Communication - France

Les habitats du Néolithique final (IV-III millénaire av. n. è.) des plaines du Languedoc oriental, implantés sur des substrats alluvio-colluviaux, posent des problèmes de lisibilité et de compréhension de leur organisation interne. L'ablation ou la mauvaise conservation des sols d'occupation fait que les structures en creux, avec leurs comblements, soient les principaux porteurs d'informations quant à la forme et à la fonction du site. De plus, le rôle joué par l'architecture en terre crue dans les processus de sédimentation entraîne une difficulté de lecture des séquences archéologiques et des problèmes de reconnaissance des vestiges en terre.

Afin de mieux comprendre l'organisation de ces habitats et de connaître les différentes activités menées dans les différentes espaces, une analyse géoarchéologique intra-site a été réalisée sur deux sites datés aux premières trois quarts du III millénaire: La Capoulière (Mauguio, Hérault) et Peyrouse Ouest (Marguerittes, Gard). L'approche géoarchéologique adopté se fonde sur l'emploi de la micromorphologie des sols comme outil d'analyse et il est guidé par des questionnements de nature sociale, économique et culturelle relatifs aux modalités d'occuper et utiliser l'espace d'habitat. Le sédiment est envisagé à ce titre comme un document culturel, porteur direct d'informations sur les activités et les comportements humaines.

Dans ce but, l'analyse microstratigraphique a permis de caractériser l'enregistrement sédimentaire des espaces intérieurs et extérieurs et délimiter, au sein des sols d'occupation, les aires d'activité potentielles (passage, espaces à vocation artisanale ou domestique, espaces délaissés ou abandonnés, parage,...), mais aussi de déterminer des activités pratiquées au sein des unités domestiques non préservées, proches des fossés, à travers l'étude des séquences de rejet qui comblient les structures en creux. De plus a été possible d'analyser les techniques de construction des sols et murs en terre crue, ainsi que l'implantation du site au sein de son territoire à travers l'étude de l'exploitation des ressources. Le village est en effet le point de convergence des principales chaînes opératoires liées à la transformation de ressources pour l'alimentation, à la construction ou à l'artisanat. Les marqueurs de ces pratiques peuvent être identifiés et caractérisés dans les archives sédimentaires du site à l'échelle microscopique.

**Mots-Clés:** géoarchéologie, micromorphologie des sols, Néolithique, processus de formation de la stratigraphie archéologique

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: alessandro.peinetti@gmail.com

## Datations U/Th des voiles carbonatés pariétaux en grotte ornée : mise en évidence d'ouverture de système dans la grotte de Nerja. Implication pour la chronologie de l'art pariétal.

Edwige Pons-Branchu <sup>\*ψ1</sup>, Hélène Valladas <sup>1</sup>, Jose Luis Sanchidrian <sup>2</sup>, Maria Angeles Medina-Alcaide <sup>3</sup>,  
Anita Quiles <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement [Gif-sur-Yvette] (LSCE) – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines : UMR8212, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives : DRF/LSCE,  
Université Paris-Saclay, CNRS: UMR8212 – France

<sup>2</sup> University of Cordoba UCO, Geography and Territory Sciences, Cardenal Salazar s/n, 14071 Cordoba, Spain – Espagne

<sup>3</sup> University of the Basque Country UPV/EHU, Geography, Prehistory and Archaeology – Espagne

<sup>4</sup> Institut français d'archéologie orientale du Caire (IFAO) – Égypte

L'intérêt de dater les voiles de carbonate secondaires recouvrant des tracés pariétaux notamment quand leur datation directe par le carbone 14 n'est pas possible, a été mis en lumière au cours des quinze dernières années. Récemment plusieurs applications ont été publiées qui utilisent la seule méthode uranium-thorium (ou U/Th) pour dater les dépôts présents sur des peintures préhistoriques. (Pike et al., 2012, Hoffmann et al., 2016).

Dans notre approche chronologique des voiles carbonatés, nous proposons de coupler les méthodes U/Th et du 14C sur le même échantillon. Plusieurs exemples de datation de voiles prélevés dans la grotte de Nerja (Andalousie, Espagne) seront présentés. Selon les cas, ce couplage de méthodes a permis de valider les datations (cohérence des âges obtenus par les deux méthodes) ou, au contraire, de montrer que les âges très différents mettent en lumière une "ouverture du système", c'est-à-dire une probable mobilisation des radio-éléments présents dans le voile conduisant à des âges radiométriques faussés.

Nous présenterons également des analyses par la méthode U/Th de plusieurs prélèvements effectués sur un secteur restreint de la grotte, qui mettent clairement en évidence un lessivage de l'uranium conduisant à des âges apparents beaucoup plus anciens que l'âge réel de la calcite.

Hoffmann et al., 2016 Methods for U-series dating of CaCO<sub>3</sub> crusts associated with Palaeolithic cave art and application to Iberian sites Quaternary Geochronology 36 , 104-119.

Pike. et al., 2012. U-Series Dating of Paleolithic Art in 11 Caves in Spain. *Science* 336:1409-1413.

**Mots-Clés:** Archéométrie, chronologie, art pariétal

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: edwige.pons-branchu@lsce.ipsl.fr

## Biodiversité des sols viticoles : un héritage des modes d'occupation et des pratiques culturelles anciennes ?

Amélie Quiquerez <sup>\*1</sup>, Jean-Pierre Garcia <sup>1</sup>, Samuel Dequiedt <sup>2</sup>, Audrey Sassi <sup>1</sup>, Lionel Ranjard <sup>2</sup>, Olivier Mathieu <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Archéologie, Terre, Histoire, Sociétés [Dijon] (ARTeHiS) – CNRS : UMR6298, Université de Bourgogne-Franche Comté, Ministère de la Culture et de la Communication – France

<sup>2</sup> Agroécologie [Dijon] – Institut national de la recherche agronomique (INRA) : UMR1347 – France

<sup>3</sup> Biogéosciences [Dijon] (BGS) – CNRS : UMR6282, Université de Bourgogne-Franche-Comté – France

Le terroir viticole témoigne de l'action conjuguée sur le temps long des activités humaines (occupation des sols, aménagements et pratiques culturelles) et des facteurs naturels (lithologie, climat, pente). A ce jour, une grande part d'inconnu réside dans la composante microbiologique, et en particulier dans la biodiversité microbienne du sol en interaction avec la plante, les éléments structuraux, les actions climatiques et les pratiques culturelles actuelles et passées. La compréhension des écosystèmes des sols devient un enjeu essentiel pour la conservation des sols. Les communautés microbiennes du sol sont démontrées comme sensibles aux pratiques culturelles et aux changements de mode d'occupation des sols. A ce titre, il est possible d'envisager que la biodiversité microbienne des sols viticoles puisse refléter les modes d'occupation et des pratiques culturelles passées. Pour tester cette hypothèse, des analyses de diversité et de composition microbienne des sols viticoles ont été réalisées sur des parcelles viticoles de Pernand-Vergelesses (Bourgogne) dont les trajectoires d'occupation sont connues. Les paramètres physico-chimiques des sols ont été mesurés. L'abondance et la diversité des communautés microbiennes des sols viticoles ont été caractérisées par des techniques de génomique environnementale basées sur la caractérisation de l'ADN extrait des sols. Les résultats obtenus suggèrent des différences dans la biomasse et l'écologie des taxons identifiés qui peuvent être reliés à l'histoire d'occupation forestière de la parcelle.

**Mots-Clés:** Occupation, Sol viticole, Biodiversité microbienne

<sup>\*</sup>Intervenant

## Mise en évidence d'un dépilage médiéval par méthodes micro-gravimétrique et électrique, Castel-Miner, Ariège

Lucia Seoane <sup>\*ψ1</sup>, Muriel Llubes <sup>1</sup>, Florian Téreygeol <sup>2</sup>, Nicolas Florsch <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – Institut de Recherche pour le Développement, Université Paul Sabatier - Toulouse 3, Observatoire Midi-PyrénéesCNRS : UMR5563 – Observatoire Midi-Pyrénées 14 Avenue Edouard Belin 31400 Toulouse, France

<sup>2</sup> Institut de Recherches sur les Archéomatériaux (IRAMAT) – Université de Technologie de Belfort-Montbeliard : UMR5060, Université d'Orléans : UMR5060, université Bordeaux Montaigne : UMR5060, CNRS: UMR5060 – France

<sup>3</sup> UMI 209 UMMISCO Sorbonne Université – Université Pierre et Marie Curie - Paris 6 – France

Dans les Pyrénées ariégeoises, sur la commune d'Aulus-les-bains, s'est développée, entre la fin du XIII<sup>e</sup> s. et le XVe siècle, une importante activité minière visant la production d'argent, de cuivre et de plomb. Elle a connu son heure de gloire dans la première moitié du XIV<sup>e</sup> siècle en devenant l'une des principales mines d'argent du royaume de France. Ces mines prennent place sur un gîte filonien complexe composé de 2 filons principaux parallèles longs de plus de 300 m et d'une puissance métrique, s'y associent plusieurs filons croiseurs. La partie orientale des grands filons est largement accessible et fait l'objet d'une étude archéologique. Plusieurs fouilles entreprises sur des entrées comme sur des chantiers profonds ont montré la richesse architecturale et technique de ces mines. Dans la partie occidentale, les plans des ingénieurs des XIX et XX<sup>e</sup> siècles travaillant à la réouverture de cette mine pointent d'anciens travaux qui, aujourd'hui comme hier, restent inaccessibles par le souterrain comme par l'extérieur. L'importance des travaux de décombremet, leur coût en temps de travail et en moyens à déployer incite à chercher à confirmer l'existence d'espaces non-colmatés à une distance de la surface inférieure à 20 m. Suite à l'utilisation d'outils d'exploration géophysique : micro-gravimétrie et tomographie électrique ("ERT") la présence des cavités dans la partie occidentale est quasi certaine, la signature de cavités apparaissant clairement. Ce sont ces investigations géophysiques qui font l'objet du travail présenté, de la mesure à l'interprétation.

**Mots-Clés:** Mines d'argent, Moyen âge, microgravimétrie, ERT, géophysique, Ariège

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: lucia.seoane@get.omp.eu

## Histoire de la plaine de la Tille (Côte d'Or, 21) de la Préhistoire à nos jours - Etude pluridisciplinaire de l'évolution naturelle et des transformations anthropiques du paysage

Dominique Sordoillet <sup>\*ψ</sup>, Isabelle Jouffroy-Bapicot <sup>2</sup>, Olivier Girardclos <sup>2</sup>, Alexandre Burgevin <sup>3</sup>,  
Eve Espinosa <sup>4</sup>, Didier Lamotte <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Chrono-environnement (INRAP - UMR 6249) - INRAP, CNRS - France

<sup>2</sup> CHRONO-ENVIRONNEMENT UMR 6249, CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-25000 Besançon, France -  
CNRS : UMR6749 - France

<sup>3</sup> INRAP Bourgogne - Franche-Comté - INRAP - France

<sup>4</sup> Université Paris 7 - Master Géographie, Histoire et Sciences de la Société - Université Paris Diderot - Paris 7,  
Université Paris Diderot - Paris 7 - France

A l'occasion des divers travaux d'archéologie préventive réalisés ces dernières années dans la plaine de la Tille, au sud-est de Dijon (Bourgogne), de nombreuses données relevant de la géomorphologie, de la micromorphologie, de la palynologie et de la dendrologie ont pu être collectées et confrontées aux résultats issus de l'étude des aménagements et des vestiges archéologiques. Ces différentes disciplines livrent chacune leur perception de l'histoire du paysage et de ses occupations humaines, perceptions qui sont confrontées et intégrées afin d'aboutir à une proposition argumentée de l'évolution de la plaine de la Tille et de son occupation, de la Préhistoire à l'Actuel. Les grandes lignes de cette évolution comptent au moins deux paléosols (fluvisols) plus ou moins évolués, séparés par une période d'alluvionnement post-antique, dont la cause climatique ou anthropique fait l'objet de discussions. Elles révèlent également deux principales phases de fonctionnement hydrologique, globalement datées du Tardiglaciaire au début de l'Holocène pour la première, et de l'Antiquité tardive au Haut Moyen-Age pour la seconde. Ces phases hydrologiques sont marquées par des colmatages argilo-organiques de paléoméandres, favorables à la conservation des restes archéo-organiques et donc à la restitution chronophasée de l'environnement végétal. Des niveaux d'incendie anciens, d'origine médiévale probable, sont également enregistrés par endroit. Enfin, sont également pris en compte dans cette reconstitution, les atouts et les contraintes hydrologiques caractéristiques de cet écosystème particulier qu'est la plaine alluviale, ainsi que l'érosion et le brouillage de l'information occasionnés par les activités agricoles modernes et contemporaines.

**Mots-Clés:** archéologie préventive, plaine alluviale, marais, paléosols, paléo, méandres, contraintes hydrologiques, Tardiglaciaire, Age des métaux, Antiquité, Moyen, Age, Actuel, géomorphologie, micro-morphologie, palynologie, dendrologie

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: dominique.sordoillet@univ-fcomte.fr

## Géoarchéologie de la pointe orientale de l'île Smith, Nunavik, Canada

Dominique Todisco <sup>\*¶1</sup>, Najat Bhiry <sup>2</sup>, Marguerie Dominique <sup>3</sup>, Pierre Desrosiers <sup>4</sup>,  
Myosotis Bourgon Desroches <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Département de géographie, Université de Rouen - CNRS UMR IDEES - France

<sup>2</sup> Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec - Canada

<sup>3</sup> Université de Rennes - UMR 6553 ECOBIO - France

<sup>4</sup> Département de Géographie - Université Laval - Québec, Canada

L'île Smith, située à proximité du village Inuit d'Akulivik (Baie d'Hudson, Nunavik, Canada), possède d'importants vestiges archéologiques tant paléoesquimaux que néoesquimaux. Ces derniers sont principalement localisés à l'extrême orientale de l'île, où une petite vallée postglaciaire héberge de nombreuses habitations et structures, reliées aux cultures dorsétienne et thuléenne/Inuit. Ces vestiges forment collectivement le site de Kangiakallak (JeGn-2), l'un des premiers sites découverts et fouillés par les archéologues pionniers du "Nord", durant les années 1940 et 50. Les nouvelles fouilles, entreprises durant les années 2011 et 2013, sur le replat sommital de la vallée postglaciaire, montrent que les occupations dorsétaines sont ici caractérisées par plusieurs maisons hivernales semi-enterrées, toutefois peu profondes. Postérieurement, sur le rebord sommital de la vallée investiguée, les Thuléens/Inuit construisirent des maisons semi-enterrées plus profondes (qarmait), pouvant reprendre d'anciennes implantations dorsétaines. Ces faits archéologiques révèlent que la pointe orientale de l'île Smith représente un secteur stratégique pour les campements hivernaux depuis plusieurs siècles, probablement en raison de la présence d'une polynie localisée entre le continent et l'île. Une approche géoarchéologique intégrative et multiscalaire a été conduite afin de caractériser l'évolution paléoenvironnementale du site de Kangiakallak, représentatif des milieux anthropisés de toundra arctique herbacée du Nunavik, localisés en zone de pergélisol continu. Les investigations géomorphologiques extra-site ont été menées afin de 1) caractériser l'environnement périglaciaire actif, et 2) l'évolution paléogéographique holocène de l'île Smith. Cette évolution est à mettre en lien avec la déglaciation, l'invasion de la mer postglaciaire de Tyrrell, le relèvement isostatique (environ 0,9 m/siècle depuis 2000 ans), et la mise en place de plages marines soulevées (entre 2 et 21 d'altitude ; de 129 à 3119 ans cal. BP), sur lesquelles les sites archéologiques sont localisés. A l'échelle intra-site, les analyses paléoécologiques (macrorestes végétaux) et micromorphologiques permettent de documenter les processus de formation naturels (dépositionnels, biopédologiques, cryogéniques, hydriques) et anthropiques des sites, par aires d'activités et secteurs (mur versus centre des structures), et par phases d'occupation ou d'abandon. L'étude micromorphologique de deux structures, l'une dorsétienne (structure 5 : ca. 720-679 ans cal. BP), l'autre Thuléenne/Inuit (structure 9 : ca. 674-616 ans cal. BP), permet d'illustrer les types de microfaciès anthropiques où les restes de gras brûlés et de charbons traduisent des rejets domestiques ou des zones de préparation alimentaire. Des microfaciès organiques ou sablo-organiques, à mousse tourbeuse, tiges et branches, sont interprétés en fonction de possibles aménagements anthropiques (zone de couchage, plancher).

**Mots-Clés:** Géoarchéologie, géomorphologie, micromorphologie, périglaciaire, Dorsétiens, Thuléens, Nunavik

\*Intervenant / ¶Auteur correspondant: [Dominique.todisco@univ-rouen.fr](mailto:Dominique.todisco@univ-rouen.fr)

## Processus de formation du gisement de La Roche-à-Pierrot, Saint-Césaire : nouveaux résultats géoarchéologiques d'une séquence clé du paléolithique français.

Dominique Todisco <sup>\*1</sup>, Carolina Mallol <sup>2</sup>, Isabelle Crevecoeur <sup>3</sup>, Christelle Lahaye <sup>4</sup>, Guillaume Guérin <sup>4</sup>,  
François Bachellerie <sup>5</sup>, Cédric Beauval <sup>6</sup>, Jean-Guillaume Bordes <sup>3</sup>, Brad Gravina <sup>3</sup>,  
François Lacrampe-Cuyaubère <sup>6</sup>, Xavier Muth <sup>7</sup>, Eugène Morin <sup>8</sup>, Hélène Rougier <sup>9</sup>

<sup>1</sup> Département de géographie, Université de Rouen - IDEES - France | <sup>2</sup> Archaeological Micromorphology and Biomarker Research Lab, IUBO, Tenerife - Espagne | <sup>3</sup> Université de Bordeaux - PACEA (UMR 5199) - France  
<sup>4</sup> Université Bordeaux, Montaigne Maison de l'Archéologie - UMR 5060 IRAMAT - France | <sup>5</sup> Archéologie Alsace - Archéologie d'Alsace, Archéologie d'Alsace - France | <sup>6</sup> Sarl Archéosphère, Get in Situ Sarl - Sarl Archéosphère - France | <sup>7</sup> Get in Situ Sarl - Suisse | <sup>8</sup> Département d'Anthropologie, Trent University - Canada  
<sup>9</sup> Department of Anthropology, California State University Northridge - États-Unis

Localisé à Saint-Césaire, à l'est de Saintes, en Charente-Maritime, le gisement de La Roche- à-Pierrot est au cœur des débats sur la transition entre le Paléolithique moyen et le Paléolithique supérieur. Outre le fait qu'il ait livré une séquence exceptionnelle de niveaux moustériens, châtelperronien et aurignaciens, il est aussi le premier, et seul gisement à ce jour, à avoir fourni un squelette relativement complet de Néandertalien accompagné d'outils diagnostiques du Paléolithique supérieur. Toutefois, de nombreuses incertitudes demeurent quant à la nature de la séquence chrono-culturelle. Plusieurs points d'interrogation subsistent notamment quant à l'intégrité des dépôts (spécifiquement ceux du Châtelperronien) et à l'identité chrono-culturelle de certaines industries identifiées. Dans ce contexte, la compréhension très fine des processus génétiques, de leurs causes, des phénomènes post-dépositionnels, et des altérations taphonomiques représente un véritable enjeu scientifique. Les nouvelles fouilles archéologiques entreprises sur le site depuis 2013, nous ont donné l'occasion de commencer une étude géoarchéologique approfondie du gisement, de ses dépôts et de son environnement géomorphologique. Cette étude s'inscrit dans la continuité des travaux de Miskovsky et Lévêque (1993), qui ont fondé leur interprétation de l'archéostratigraphie sur une coupe de référence aujourd'hui disparue. Ces auteurs ont reconnu différents niveaux, regroupés en deux principales séquences : un ensemble supérieur jaune (niveaux du Paléolithique supérieur), et un ensemble inférieur gris (Paléolithique moyen). Les principaux objectifs des nouvelles investigations géoarchéologiques visent à: 1) comprendre l'évolution géomorphologique générale du site dans son contexte karstique, 2) établir la lithostratigraphie des dépôts, 3) en caractériser la genèse et 4), évaluer l'impact des processus géomorphologiques sur l'intégrité des assemblages archéologiques (taphonomie). Les nouvelles observations stratigraphiques couplées à une lecture micromorphologique des principaux faciès, à l'analyse du sourcing sédimentaire et des fabriques des vestiges, permettent d'aller plus loin dans la compréhension des processus de formation du site. L'existence d'une paleoforme karstique, recoupée et ouverte par le recul de la corniche turonienne jouxtant le site peut être avancée. L'édification d'un talus détritique s'est opérée sur la paléotopographie du substrat turonien façonné en paléoterrasse, altérée et météorisée en dalles et plaquettes plongeantes. La géométrie des dépôts, et les faciès/microfaciès associés, laissent supposer une dynamique de versant dominée par des mouvements de masse redistribuant des apports hétérométriques. L'intervention de la solifluxion, voire de petites coulées de débris, en lien ou non avec d'autres processus de versant, indiquerait que la redistribution des apports sédimentaires a participé à l'enfoncement des vestiges archéologiques.

**Mots-Clés:** Géoarchéologie, Paléolithique, taphonomie, solifluxion, micromorphologie, Moustérien, Châtelperronien, Saint, Césaire

\*Intervenant

## \*Intervenant Fuliginochrologie: une nouvelle méthode d'étude des encroûtements carbonatés incluant de la suie, archives micro-chronologiques pour reconstituer les chroniques de paléo-feux anthropiques. [Fuliginochrology: a new method for the micro-chronological study of anthropic paleo-fire events in speleothem archives]

Ségolène Vandevelde <sup>\*1,2</sup>, Adelphine Bonneau <sup>3</sup>, Jacques Brochier <sup>4</sup>, Dominique Genty <sup>5</sup>, Tom Higham <sup>6</sup>, Farid Kherbouche <sup>7</sup>, Jean-Luc Lacour <sup>8</sup>, Christophe Petit <sup>1,2</sup>, Céline Quéré <sup>8</sup>, Jiaoyang Ruan <sup>5</sup>, Ludovic Slimak <sup>9</sup>

<sup>1</sup> Université Panthéon-Sorbonne (UP1) – France | <sup>2</sup> Archéologies et Sciences de l'Antiquité (ArScAn) – Université Panthéon-Sorbonne, Université Paris, Nanterre, CNRS: UMR7041 – France | <sup>3</sup> Université Laval (ULaval) – Canada

<sup>4</sup> Maison méditerranéenne des Sciences de l'Homme (LAMPEA) – CNRS, UMR7269, Université Aix-Marseille, Fr

<sup>5</sup> Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement [Gif-sur-Yvette] (LSCE) – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines : UMR8212, CEA, Université Paris-Saclay, CNRS: UMR8212 – France

<sup>6</sup> University of Oxford – Royaume-Uni

<sup>7</sup> Centre National de Recherches Préhistoriques, Anthropologiques et Historiques, Alger (cnrpa) – Algérie

<sup>8</sup> CEA Saclay (CEA) -- 91191 Gif-sur-Yvette cedex, France

<sup>9</sup> Travaux et recherches archéologiques sur les cultures, les espaces et les sociétés (TRACES) – Université Toulouse 2, CNRS: UMR5608 –, France

La lecture géoarchéologique des sédiments peut permettre, dans des cas favorables, une étude micro-chronologique des traces d'activités anthropiques. L'étude micromorphologique des foyers devient de plus en plus courante, mais il existe des biais dans l'enregistrement des événements de paléo-feux dans les structures de combustion. Dans cette communication, nous présenterons une autre méthode: la *Fuliginochrologie*, du latin *fuliginosus, fuligo:* suie, fuligineux/fuligineuse, et du Grec *khrōnologia:* chronologie, qui consiste à étudier la succession des dépôts de suie piégés dans une matrice. Nous ne développerons ici que les cas de suie piégés dans les dépôts carbonatés et plus particulièrement dans des spéléothèmes. Dans le cas particulier d'un site archéologique comme un abri-sous-roche ou une grotte, ces concrétions (stalagmite, croûte pariétale, plancher) fuligineuses sont des archives enregistrant des occupations humaines passées, qui peuvent être décomptées et dont le rythme de succession peut être étudié (Vandevelde et Dupuis 2017; Vandevelde et al. 2017, 2018). Cette méthode pionnière repose sur l'observation à haute résolution des couches de suie piégées dans les concrétions et sur celle des spéléothèmes, couplée à des analyses complémentaires (caractérisation: MEB, Raman, IRTF,  $\mu$ LIBS et datation: radiocarbone, U-Th). Elle sera présentée à travers deux contextes temporels différents. Dans un premier temps, la méthode sera définie et des analyses complémentaires seront présentées sur deux sites préhistoriques: sur la longue séquence archéologique paléolithique du site de la Grotte Mandrin (moyenne vallée du Rhône, France) et sur le site néolithique de la grotte de Gueldaman GLD1 (Nord de l'Algérie); la méthode sera ensuite validée sur des cas modernes (Han-sur-Lesse, Belgique ; Arcy-sur-Cure, France ; Postojna, Slovénie ; Villars, France).

**Mots-Clés:** spéléothèmes, carbonates, suie, micro, chronologie, fuliginochrologie

\*Intervenant

<sup>✉</sup>Auteur correspondant: segolene.vandevelde@univ-paris1.fr

## La géoarchéologie intra-site : une approche culturelle des archives sédimentaires préhistoriques

Julia Wattez <sup>1,2,3</sup>

<sup>3</sup> DMOS, Agroparistech - AgroParisTech, INRA - Université Paris-Saclay - France

<sup>2</sup> Institut National de Recherches Archéologiques Préventives - INRAP - France

<sup>1</sup> UMR 5041, Archéologie des sociétés méditerranéennes - France

La question des relations sociétés-milieux constitue le cœur de la recherche géoarchéologique. Elle est le plus souvent appréhendée sous l'angle de l'évolution des paléo-environnements, selon l'influence de l'Homme et du climat. De manière complémentaire, cette question est également abordée, selon une perspective palethnologique. Dans ce domaine, la géoarchéologie s'intéresse plus spécifiquement à l'histoire de l'anthropisation des sols, à la façon dont les sociétés anciennes les ont aménagés et en ont fait usage. Une partie de ces recherches aborde cette histoire sur un pas de temps long, de la fin du Pléistocène à la première partie de l'Holocène, marqué par des changements climatiques d'amplitude variable. Mais c'est aussi une période caractérisée par des changements sociaux, depuis les derniers chasseurs cueilleurs du Paléolithique et du Mésolithique aux sociétés agro-pastorales du Néolithique et de l'Age du Bronze.

Cette approche des relations sociétés-sols est documentée par une enquête sédimentaire, menée en contexte archéologique. Elle est fondée sur les principes de la micromorphologie des sols, tels qu'ils ont été adaptés pour l'étude des processus de formation des stratifications archéologiques. C'est sans doute pour ces raisons que cette tendance de la géoarchéologie a été dénommée, alternativement selon son objet d'étude (les sédimentations anthropiques), l'échelle d'étude (intra-site) ou encore par sa démarche analytique, la micromorphologie. Cependant, elle est résolument tournée vers la compréhension des dynamiques d'occupation du sol et des comportements socio-économiques qu'elles sous-tendent, comme le montrent les recherches menées depuis plus d'une vingtaine d'années. Elles ont permis de consolider les modèles sédimentaires explicatifs. Elles ont surtout amené à développer différentes thématiques qui touchent aux pratiques des sociétés anciennes et à leur rôle dans la construction du paysage, en particulier du pédo-paysage : l'exploitation et la gestion des ressources, la construction en terre crue, l'aménagement des espaces domestiques ou funéraires, les manières d'habiter des communautés mobiles ou sédentaires... Ces avancées ont conduit à réinterroger la notion de géoarchéologie lorsqu'elle concerne l'étude des archives sédimentaires, selon une perspective culturelle.

L'objectif de cette communication est d'illustrer cette conception de la géoarchéologie à partir de quelques exemples.

**Mots-Clés:** géoarchéologie, archives sédimentaires culturelles, micromorphologie, Préhistoire, Pro tohistoire



## **10. PATRIMOINE, HISTOIRE, DIFFUSION DES SCIENCES DE LA TERRE**



## 10.1. Le patrimoine géologique (sensu lato)

## Insight into the use of LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) for geochemical core logging. Application to Lower Cretaceous, iguanodon-bearing clay sequence in Ber3 borehole, Bernissart, Belgium

Jean-Marc Baele<sup>\*ψ1</sup>, Séverine Papier<sup>1</sup>, Jean-Pierre Tshibangu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> University of Mons (UMons) - Belgique

LIBS is an analytical technique based on atomic emission spectroscopy of in-situ laser-induced plasma, which allows fast elemental analysis of a wide variety of samples with no or minimal preparation and is virtually non-destructive. This technique was applied to the 45 m of Lower Cretaceous lacustrine clay sequence in Ber3 borehole (Sainte-Barbe Fm., Barremian), with the objective of looking for geochemical proxies for the taphonomic study of iguanodon bonebeds. The LIBS analysis was performed using a in-house system based on a flashlamp-pumped pulsed Nd:YAG laser running at 5 Hz (1064 nm wavelength), a multichannel Cerny-Turner spectrometer with CCD detector and a motorized linear translation stage. Measurements were made with 100 mJ pulse energy, 400 µm circular spot, 500 µm step length and in a helium atmosphere to enhance the emission of sulfur and carbon. After data processing, the > 60000 initial spectra were reduced to 4000 spectra with 1 cm resolution along the cores. The LIBS signal was monitored by measuring the peak intensity of the following elements : Si, Al, Mg, Ca, Sr, Ba, P, K, Rb, Na, Li, Be, Fe, Mn, Cr, V, Zn, Ti, S, C, O, H and He.

The results show that the different sedimentary units in the sequence can be distinguished based on LIBS data in terms of fluctuations and/or trends of the LIBS signal. In particular, the evolution of Fe and S signals would indicate more anoxic conditions in the lower part of the sequence, which is corroborated by the evolution of Mn/Fe (a proxy for oxygenation conditions). This fits well within the context of a sinkhole-induced early lake environment, possibly influenced by sulphate-rich geothermal brines. Interestingly, the Rb/K signal, a proxy for weathered (soil) material input, was found clearly peaking around the location of the known bonebeds. As previously thought, this suggests that iguanodon mass-death occurred during drier periods, in a context of receding lake, with bank collapse and/or release of toxic H<sub>2</sub>S initially stored in the sediment as possible lethal causes. The contrasting evolution of Li/Al signal could then be interpreted by input of fresh illite-muscovite derived from Carboniferous basement in more wetter climatic conditions.

Interpretation of the other LIBS signals is currently ongoing but the helium signal also fluctuates along the core, which could indicate changing plasma conditions during the measurement.

This stresses the need for investigating in more detail the possible influence of changing analytical conditions and validating the data obtained with helium by corroborating them with LIBS measurements in air and with conventional chemical analyses.

**Mots-Clés:** LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy), core logging, geochemical proxies, iguanodons, Bernissart

<sup>\*</sup>Intervenant<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: [jean-marc.baele@umons.ac.be](mailto:jean-marc.baele@umons.ac.be)



## Patrimoine pariétal récent de carrières péri-urbaines (commune de Lezennes, périphérie de Lille) : au croisement de l'histoire géologique et de l'histoire humaine

Julie Barras<sup>1</sup>, Michel Dubois<sup>\*ψ1</sup>, Eric Armynot Du Châtelet<sup>2</sup>, Philippe Recourt<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) - EA 4515 (LGCgE) – Université de Lille – France

<sup>2</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - CNRS : UMR8187, Université Littoral Côte d'Opale, Univ. Lille – France

Les carrières souterraines péri-urbaines représentent un patrimoine riche en informations concernant l'activité extractive, le développement de l'urbanisation et la sociologie des populations agricoles proches des grands centres. Si l'essentiel des travaux archéologiques concerne le travail de la pierre, les carrières représentent aussi des lieux de passage dont les parois ont reçu les traces des visiteurs (gravures, graffitis, sculptures, ...).

Les carrières de Lezennes, situées dans la métropole lilloise, ont une superficie de 70 ha, répartis sur les communes de Lezennes, Villeneuve d'Ascq et Hellemmes. Elles ont été exploitées depuis au moins le XII<sup>e</sup> siècle jusqu'au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle. On y exploitait la craie à une profondeur de 12 à 15 mètres, destinée à la construction des principaux bâtiments de la ville de Lille. Le mode d'exploitation est du type galeries/chambres et piliers. Ces carrières ont de plus été utilisées à d'autres fins pendant ou après l'extraction : refuges lors de persécutions politiques ou religieuses, abris pendant les deux dernières guerres mondiales, culture des champignons et de la chicorée, fêtes locales, ...

Dans un secteur périphérique de ces carrières, un recensement exhaustif des inscriptions, gravures, graffitis et sculptures a été réalisé. Cet inventaire patrimonial a été complété et référencé par des outils de photogrammétrie et de reconstruction 3D de la géométrie des carrières. La plupart des inscriptions sont gravées dans la craie comprenant un nom et une date, mais on retrouve aussi des dessins peints plus élaborés. Les inscriptions sont regroupées en 3 phases : 1) au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, sans doute laissées par les carriers eux-mêmes ; 2) le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle et particulièrement dans les années 1850-1900, probablement en lien avec l'extension du village (La recherche dans les registres de l'état-civil indique qu'il s'agissait de riverains des rues avoisinantes) ; 3) pendant la seconde guerre mondiale, alors que les carrières servaient d'abris pendant les bombardements.

Les carrières de Lezennes en plus d'être les principales sources des craies destinées à la construction de Lille révèlent donc une grande richesse patrimoniale : les témoignages du passage non seulement des carriers mais également plusieurs pages de l'histoire de l'agglomération en constante croissance.

**Mots-Clés:** carrières souterraines, craie, inscriptions, archivage

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: Michel.Dubois@univ-lille.fr



## Le 8ème Congrès Géologique International lors de l'Exposition Universelle de 1900 : un savant mélange de diplomatie

Jessie Cuvelier \*<sup>ψ1</sup>

<sup>1</sup> Évolution, Écologie et Paléontologie (Evo-Eco-Paleo) - UMR 8198 (Evo-Eco-Paléo) – Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique – France

L'aube du 20ème siècle est marquée par l'Exposition Universelle de 1900. Dans ce contexte, la société parisienne admire une exposition minière souterraine installée dans les carrières du 16ème arrondissement de Paris, " les catacombes du Trocadéro ". En parallèle de cet évènement, les géologues français accueillent aussi à Paris leurs collègues internationaux pour le 8ème Congrès Géologique International du 16 au 27 août 1900.

Albert Gaudry, président de cet évènement, et Charles Barrois, secrétaire général, reçoivent plusieurs centaines de géologues et paléontologues de 36 nationalités différentes afin de faire le point sur les avancées en Sciences de la Terre à l'aube du 20ème siècle. Pour la deuxième fois, et pour des raisons politiques, l'Exposition Universelle et le Congrès Géologique International coexistent à nouveau en France.

Cette rencontre implique, en amont, une logistique contraignante, de l'envoi des circulaires à la réception des inscriptions, en passant par l'organisation des excursions disséminées à travers la France et l'édition d'un livret-guide de ces dernières distribué aux participants. Cependant, l'organisation d'un colloque est surtout un exercice de diplomatie entre le Comité d'organisation, l'Etat français et la communauté scientifique internationale.

Des archives de Charles Barrois conservées au Musée d'Histoire Naturelle de Lille rendent compte, à travers une correspondance de 330 lettres, écrites en français, en allemand ou en anglais, de 1898 à 1900, des difficultés à coordonner les volontés de chacun pour la réalisation de cette réunion commune de professeurs et ingénieurs.

**Mots-Clés:** congrès scientifique, archives, histoire des sciences, géologues

\*Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: jessie.cuvelier@univ-lille.fr

## De Brest à Lille ; la kersantite, une roche bretonne collectée par Charles Barrois

Jessie Cuvelier <sup>\*ψ1</sup>, Michel Dubois <sup>2</sup>, Mahamadou Hachimi Maiga <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Évolution, Écologie et Paléontologie (Evo-Eco-Paleo) - UMR 8198 (Evo-Eco-Paléo) – Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique – France

<sup>2</sup> Laboratoire de Génie-Civil et géo-Environnement (LGCgE) – Université Lille I - Sciences et technologies : EA4515 – bât SN5, 59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX, France

<sup>3</sup> Université de Lille – Université de Lille - Sciences et Technologies – France

La kersantite, connue par les carriers sous le nom de kersanton est un matériau qui a été abondamment utilisé dans la construction des édifices religieux en Bretagne car elle est relativement tendre à tailler et résiste très bien à l'altération.

C'est une roche magmatique filonienne de la famille des lamprophyres. Elle tire son nom dans la nomenclature pétrographique internationale du hameau de Kersanton (ou Kerzanton), dans la commune de Loperhet située à proximité de la rade de Brest. Elle est l'une des deux roches dont le nom officiel est directement issu d'un toponyme de la Bretagne (Chauris, 2010). Sur le terrain, la kersantite forme des filons d'une puissance variant de moins d'un mètre à environ 20 mètres et l'ensemble des affleurements définit un croissant orienté N60 à N100.

Décrise dès 1798, la kersantite a été définie par Delesse (1850) dans les Vosges et la rade de Brest. Charles Barrois (1851-1939), nommé en 1871 à la Faculté des Sciences de Lille, a l'occasion de faire plusieurs notes sur les filons de kersantite de Bretagne dans le cadre de la cartographie de la Bretagne qui lui a été confiée à partir de 1876. Barrois distingue deux variétés de kersanton : la kersantite au sens strict, à structure grenue, et la porphyrite micacée, à texture porphyrique (en réalité, aussi une kersantite). La kersantite y est décrite comme " une diorite micacée souvent riche en quartz et chaux carbonatée [calcite] " dont " le feldspath est de beaucoup l'élément dominant " (Barrois, 1886). La présence de l'amphibole est très variable ; l'augite est répandue, l'apatite est abondante. Le mica blanc et la chlorite sont des produits secondaires.

L'UMR CNRS 8198 Evo-Eco-Paleo conserve une collection de 1930 lames minces de Charles Barrois. Au sein de cette collection, une majorité est issue de la Bretagne dont une centaine de lames est définie comme kersanton ou porphyrite micacée. L'essentiel provient de la Rade de Brest. Le ré-examen des lames et l'accès à des archives manuscrites de ce professeur a permis d'observer la diversité des faciès prospectés par Charles Barrois et de géoréférencer les affleurements échantillonés par ce professeur.

Barrois, C. (1886) *Sur le Kerzanton de la Rade de Brest*, Ann. Soc. géol. Nord, XIV, 31- 50.

Chauris, L. (2010) *Le kersanton, une pierre bretonne*. Presses Universitaires de Rennes, 242p.

Delesse, A.J. (1850) *Recherche sur le kersanton et sur quelques roches de la même famille*. Bull. Soc. géol. Fr., 7, 2<sup>ème</sup> série, 704-715.

**Mots-Clés:** Bretagne, kersantite, lamprophyre, patrimoine, collections, géoréférencement

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: jessie.cuvelier@univ-lille.fr

## Le patrimoine géologique c'est cool. Et le gisement houiller, il claque !

Jessie Cuvelier <sup>\*ψ1</sup>, Gaëlle Guyétant <sup>2</sup>, Thierry Oudoire <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Évolution, Écologie et Paléontologie (Evo-Eco-Paleo) - UMR 8198 (Evo-Eco-Paléo) – Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique – France

<sup>2</sup> Conservatoire d'espaces naturels du Nord et du Pas-de-Calais, ZA de la Haie, 160 rue Achille Fanien, 62190 Lillers – France

<sup>3</sup> Musée d'Histoire Naturelle de Lille – France

Le gisement houiller du Nord - Pas-de-Calais, exploité entre les XVIIe et XXe siècles, a laissé dans l'histoire, la culture régionale, le territoire, de nombreuses empreintes et témoignages (terrils, cités minières, collections de roches et fossiles, objets en tous genre, etc.). Si sur le terrain, le sentiment général autour de ces objets a varié d'une époque à une autre et d'un territoire à un autre, depuis quelques années différentes initiatives publiques ou civiles ont résolu d'inventorier, de protéger et faire connaître ce qui est reconnu maintenant comme un patrimoine international à l'UNESCO. La déclinaison régionale de l'inventaire du patrimoine géologique (IRPG) est l'une de ces initiatives. L'impact de l'exploitation du gisement houiller ne fut pas qu'économique, industriel et culturel. Il fut aussi scientifique : amélioration des connaissances structurelles de notre sous-sol, notions sur la biodiversité passé et reconstitutions paléoenvironnementales à partir des formations carbonifères, etc. Ces traces témoignent aussi de la vision, de la compréhension qu'avaient nos aïeux de leur territoire et de leur ingéniosité à l'exploiter.

Les objets in-situ et ex-situ qui résultent de l'exploitation illustrent, chacun à leur manière, le formidable progrès scientifique lié à cette période et sont à ce jour un patrimoine à conserver.

L'intégration de certains d'entre eux dans l'IRPG permettra une mise en lumière de la valeur patrimoniale et d'envisager des protections et des actions de valorisation.

Cette démarche est présentée ici, au travers des collections et objets liés à l'exploitation du gisement houiller, avec des statuts actuels variés : objets présentés à un large public au Musée d'Histoire Naturelle de Lille pour certains, collections utilisées à des fins scientifiques à l'Université de Lille pour d'autres ou sites naturels gérés par le Conservatoire d'espaces naturels du Nord et du Pas-de-Calais.

**Mots-Clés:** Patrimoine minier, houiller, inventaire, Nord Pas de Calais

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: jessie.cuvelier@univ-lille.fr



## Le récit dans la médiation scientifique : " raconter " pour construire la linéarité des temps géologiques

François Dessart \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sciences et Société ; Historicité, Éducation et Pratiques (EA S2HEP) - École Normale Supérieure (ENS) - Lyon, Université Claude Bernard - Lyon I (UCBL) : EA4148 - Bâtiment " La Pagode " - 38 Boulevard Niels Bohr - Campus de la DOUA Villeurbanne Cedex, France

La géologie est une science historique : elle tente d' " expliquer " les structures géologiques actuelles de notre planète en reconstituant leur *histoire*. Ces explications construites par les géologues s'appuient d'une part sur leur connaissance des mécanismes à l'œuvre (*approche fonctionnaliste*) et d'autre part sur l'organisation de ces mécanismes *dans le temps et l'espace* (*approche historique*). Car pour les géologues, il ne s'agit pas seulement de comprendre comment de tels phénomènes géologiques sont *possibles*. Il faut également reconstituer la *succession des événements contingents* qui composent " l'*histoire géologique* " d'un lieu précis.

C'est par le recours à la *narration* que le géologue construit une histoire. Au lieu de mettre de coté le temps comme le font la plupart des modèles fonctionnalistes, il contraint sa reconstitution historique par une *linéarité du temps*. Dès lors, ce ne sont pas des *phénomènes* qui s'organisent dans le temps, mais bel et bien des *événements, uniques* (ils ne se répètent pas) et *contingents* (ils auraient pu ne pas exister).

Nous défendons l'idée que la *mise en intrigue* permet non seulement l'élaboration d'une communication scientifique accessible à tous (et pas uniquement aux spécialistes) mais surtout, rend possible cette *configuration* des événements le long des temps linéaires. Ainsi, en confrontant *faits et idées*, et en les articulant autour d'une "brèche" dans le cours des choses, la *mise en intrigue* organise la *succession* des événements dans le temps. Mais, en construisant les *raisons d'exister des événements*, le récit s'écarte surtout d'une *simple chronologie de sens commun*. Il permet notamment d'articuler les *ascendances* des événements : ainsi, par une *lecture à rebours* de l'*histoire*, il envisage les *conditions de possibilité* que les événements s'imposent mutuellement le long des temps linéaires.

A titre d'exemple, les principes de superposition, recouplement, inclusion, principes fondamentaux de la stratigraphie, sont profondément *narratifs* : ils représentent les étapes d'une *causalité kantienne*, selon laquelle ce qui suit ne peut exister qu'à la condition qu'il existe un événement qui précède. Ainsi, en articulant lecture/rétro-lecture, et nécessité/contingence, le *récit organise le disparate*. Dès lors, des traces dispersées dans la nature sont autant d'archives géologiques potentielles, susceptibles d'être incluses dans un *récit géologique* organisé autour d'une *causalité* qui rend l'"*histoire*" *cohérente* et *rationnelle* : chaque événement n'existe que de par sa relation aux autres événements.

C'est donc bien grâce à la narration que les événements géologiques se construisent. En quelques sorte, le *récit précède l'événement*. Loin d'être une évidence de l'*expérience vécue*, l'*événement* est une construction dépendante du récit, qui en constitue le cadre théorique, mais également les limites. Le récit ne devient-il pas, dès lors, un *obstacle*?

**Mots-Clés:** Géologie, Terrain, Récit, Vulgarisation, Histoire

\*Intervenant



## L'Inventaire National du Patrimoine Géologique, bilan

Grégoire Egoroff <sup>\*1</sup>, Patrick De Wever <sup>1</sup>, Annie Cornée <sup>1</sup>, Claire De Kermadec <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Muséum National d'Histoire Naturelle – Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique – 43, rue Buffon 75005 Paris, France

<sup>2</sup> Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (MTES) – Ministère de la Transition écologique et solidaire – France

Le programme de connaissance de l'inventaire national du patrimoine géologique français, officiellement lancé en 2007, fête ses 10 ans. Il a été instauré par la loi dite de " Démocratie de proximité " du 27 février 2002 qui a institué l'" Inventaire du Patrimoine Naturel " sur l'ensemble du territoire.

Ce grand programme national de recensement et de diffusion d'informations géologiques est mis en œuvre à l'échelle régionale par les Directions régionales du ministère de l'environnement (DREAL, DEAL ou DRIEE) assistées des Commissions Régionales du Patrimoine Géologique (CRPG). La méthodologie utilisée prévoit de renseigner plusieurs dizaines de champs descriptifs obligatoires, de citer les principales références bibliographiques, de mentionner les collections associées aux sites, de fournir leur cartographie, et permet une évolution des fiches dans le temps (corrections, compléments etc.) qui fait de ce programme un des plus exhaustifs en comparaison de ses homologues européens et mondiaux.

Le bilan est positif : toutes les régions ont pratiquement fini la première phase de leur inventaire (recensement et validation) et de nombreuses données validées au niveau national sont maintenant diffusées. À terme, la première génération de fiches de ce programme devrait fournir les données portant sur environ 4 000 objets ou sites d'intérêt géologique.

**Mots-Clés:** Inventaire, Patrimoine géologique, géosite, géodiversité, base de données

<sup>\*</sup>Intervenant

## Les collections documentaires de la Société Géologique du Nord (SGN) : d'un public à un autre

Marie-Madeleine Geroudet <sup>\*ψ1</sup>, Jessie Cuvelier <sup>2</sup>, Laure Delrue <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Lille – Université des Sciences et Technologies de Lille - Lille I – France

<sup>2</sup> Évolution, Écologie et Paléontologie (Evo-Eco-Paleo) - UMR 8198 (Evo-Eco-Paléo) – Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique – France

Fondée en 1870, la Société Géologique du Nord, éditrice d'une revue, les Annales, de mémoires et de bulletins, a constitué une collection documentaire particulièrement riche en géologie, minéralogie et paléontologie, grâce à des échanges et à un réseau de géologues et d'amateurs, développé à l'international. En 2009, elle fait don de cette collection constituée de 1050 titres de revues, 1800 ouvrages et d'archives au Service Commun de Documentation (SCD-LILLIAD) de l'Université de Lille – Sciences et Technologies, dans le cadre d'un partenariat qui inclut la conservation des collections, leur mise en valeur par des actions de numérisation et la poursuite de l'accroissement du fonds par une politique d'échanges.

Conserver, signaler et valoriser ce fonds auprès de publics variés : tel est aujourd'hui l'objectif commun de la SGN et du SCD. A partir des projets en cours, cette communication montrera comment les compétences croisées de la SGN et du SCD permettent de porter la valorisation des collections géologiques auprès des chercheurs comme des amateurs et du grand public, et de quelle manière ces différents publics s'approprient les contenus qui leur sont proposés.

Après un aperçu de l'histoire de la constitution du fonds, nous mettrons l'accent sur les opérations de numérisation réalisées dans le cadre de la bibliothèque numérique en histoire des sciences IRIS (dont l'accès libre aux Annales de la SGN). Le travail d'inventaire et de signalement des collections s'opère de front avec la mise en œuvre d'actions de valorisation : organisation de conférences autour des collections, mise à disposition des ouvrages dans le cadre d'expositions, dissémination des contenus numérisés sur Internet et conception collaborative d'expositions virtuelles. Le résultat de cette activité de valorisation se traduit par le développement d'usages des collections physiques et numériques : réutilisation par des chercheurs, dans des projets scientifiques, par des amateurs, sur des sites personnels ou dans des actions de médiation. Enfin, nous envisagerons les perspectives pour la poursuite d'actions croisées autour de ce patrimoine documentaire géologique : numérisation des archives en cours d'inventaire, affinage de la structuration des collections numériques, afin de développer de nouveaux usages de recherche, intégration dans des dispositifs de médiation à destination des élèves du secondaire (concours Retour vers le futur !) dans un objectif de renforcement des liens entre les chercheurs et ce public.

**Mots-Clés:** bibliothèques, numérisation, vulgarisation, patrimoine géologique, médiation

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: marie-madeleine.geroudet@univ-lille.fr

## SWISSOIL : un outil de découverte du patrimoine pédologique

Stéphanie Grand <sup>\*1</sup>, Fanny Viret <sup>1</sup>, Eric Verrecchia <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Lausanne, Faculté des Géosciences et de l'Environnement (UNIL-FGSE) – Suisse

L'outil SWISSOIL est une plate-forme didactique basée sur l'observation directe de sols au sein de leur environnement naturel ou anthropisé. SWISSOIL a pour but de faire découvrir les sols à des publics variés, allant de l'étudiant débutant un cours de pédologie aux enfants en camps de vacances et passant par le simple promeneur en forêt. La base physique du projet consiste en cinq fosses pédologiques permanentes ouvertes depuis 2016 sur le campus de l'Université de Lausanne. Ces cinq fosses sont sécurisées par des barrières, régulièrement rafraîchies et peuvent être visitées par tous.

Chaque fosse est identifiée par un code QR renvoyant à un site web en accès libre. Le site fournit un guide d'observation et d'interprétation des profils organisé selon deux niveaux. Le premier niveau est celui du néophyte. Ce niveau comprend du matériel introductif sur les sols et leur biodiversité ainsi que sur les différents services écosystémiques fournis par les sols. Des vidéos explicatives emmènent l'observateur curieux à la découverte du projet et des fosses, en soulignant les particularités et les conditions de formation de chaque sol. Des quiz sont aussi disponibles pour tester ses connaissances.

Le deuxième niveau de la ressource en ligne est celle du pédologue en formation (l'étudiant en sciences du sol). Ce niveau comprend des fiches descriptives professionnelles sur les formes d'humus et la classification des sols ainsi que des résultats scientifiques d'analyses. Ces analyses sont issues de plusieurs disciplines telles que la botanique, la physique, la chimie, la biologie ou la micromorphologie des sols. Cette base de données multi-disciplinaire centrée sur le sol permet aux étudiants d'approfondir leurs connaissances au travers d'exercices d'intégration et d'interprétation de haut niveau.

L'outil SWISSOIL permet une valorisation directe de la diversité pédologique du campus, en accès inédit pour la communauté universitaire et pour le grand public. Au-delà des étudiants en pédologie, la plate-forme a déjà servi de support officiel pour des excursions de professionnels de l'agriculture et de la viticulture, d'amateurs de sciences naturelles, d'anciens étudiants de l'université ainsi que pour des activités scolaires et de vacances. Cet enthousiasme démontre qu'il existe une demande latente de découverte de notre environnement pédologique et géologique. Cette demande cristallise lorsqu'une possibilité d'observation et d'interprétation est offerte. En ouvrant des fosses permanentes et en proposant un guide d'interprétation, SWISSOIL a transformé les sols du campus en exhibition permanente d'histoire naturelle *in situ*.

**Mots-Clés:** Profils de sol, pédologie, pédogénèse, sensibilisation, services écosystémiques

<sup>\*</sup>Intervenant

## Richesses et insuffisances de la Banque du Sous-Sol

Francis Meilliez <sup>\*1,2</sup>, Hervé Coulon <sup>ψ3</sup>, Joris Mavel <sup>φ4</sup>, Fabien Graveleau <sup>§1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – Université de Lille, CNRS : UMR8187, Université du Littoral Côte d'Opale – France

<sup>2</sup> Société Géologique du Nord (SGN) – Université de Lille – France

<sup>3</sup> CEREMA (CEREMA) – CEREMA Nord-Picardie – France

<sup>4</sup> Sciences Environnement (Sciences Environnement) – Bureau d'Etude en Environnement – France

La Banque du Sous-Sol (BRGM) impose, depuis 1958, la déclaration des ouvrages dont la profondeur dépasse dix mètres sous la surface du sol, et rend accessible à tout citoyen les données publiques recueillies (Article 131 du Code Minier). Depuis 2003 s'y ajoutent les ouvrages concernant la ressource en eau. L'outil complète la carte géologique numérique, consultable à diverses échelles. Mais si la profession n'y prend pas garde, il deviendra pervers et scientifiquement peu satisfaisant. L'apprentissage n'est pas facile pour le citoyen non initié à la géologie. Mais une fois cette étape franchie, l'attitude critique à adopter vis-à-vis des données est une vraie question. En pratique, le citoyen consulte pour savoir sur quel matériau est bâtie sa maison et se voit proposer la carte uniformisée, avec la légende de la carte géologique de la France à 10-6 ! Pas très explicite ! S'il veut savoir pourquoi son village a été inondé lors du dernier orage, mais pas le voisin, il ne lit pas sa réponse. Or c'est par ce genre de questions qu'on popularisera une culture géologique citoyenne. Pour obtenir un marché, les techniciens des petites entreprises ou des collectivités territoriales peuvent être tentés de limiter les travaux de reconnaissance grâce à la BSS.

La pratique de l'analyse de sondages et/ou du lever de carte géologique enseignent que l'âge d'un terrain n'est pas un élément de diagnostic, mais une étiquette caractérisant une tranche de terrain. Or la plupart des "coupes de sondage" de faible profondeur se réduisent à cela. Certains dossiers comportent un "log de synthèse" qui conserve des éléments de description lithologiques. Parfois, les documents de chantier sont accessibles ; encore faut-il savoir les décrypter. Du côté de l'utilisateur, le risque est celui de l'insatisfaction et du désintérêt : pourquoi faire l'effort de comprendre un outil que seuls les initiés sont capables de déchiffrer ?

Il faut donc réagir. Enrichir la BSS d'une pédagogie n'est pas un projet simple, et certainement un objectif vers lequel faire converger plusieurs acteurs. L'accès au document numérique et l'incitation à s'exprimer sont si aisés aujourd'hui que la communauté des géologues a tout intérêt à faciliter la compréhension publique des phénomènes naturels. Pour cela, avec les acteurs de la formation (monde académique) et ceux de la culture scientifique (sociétés savantes, réseau CCSTI), il faut imaginer un accompagnement pédagogique de la BSS à l'usage de tous. Une association comme la Société Géologique du Nord a entrepris une tâche pour soutenir les professeurs des écoles et de collège, en appui de la Maison pour la Science au service des professeurs impulsée par l'Académie des Sciences. Des ateliers, de terrain et de laboratoire, des séances d'initiation à l'utilisation d'Infoterre sont à l'étude. La montée en puissance de la démarche participative, bien comprise, doit aider à réhabiliter le sens de l'observation et contribuer à la protection du patrimoine géologique.

**Mots-Clés:** BSS, culture scientifique, citoyen, pédagogie, géopatrimoine

## Les élèves au temps des catastrophes

Denise Orange Ravachol <sup>\*1,2</sup>, Christian Orange <sup>\*3,4</sup>

<sup>1</sup> Centre Interuniversitaire de Recherche en Education de Lille (CIREL) - EA 4354 - Université de Lille : EA4354 – Fr

<sup>2</sup> Comité français d'histoire de la géologie (COFRHIGEO) – Comité français d'Histoire de la Géologie - France

<sup>3</sup> Université Libre de Bruxelles – Belgique

<sup>4</sup> Centre de recherche en éducation de Nantes (CREN) – Université de Nantes : EA2661 – France

A l'Ecole, le travail des problèmes géologiques s'inscrit désormais dans le cadre de l'Education au Développement Durable. Les élèves se voient ainsi contraints d'intégrer des préoccupations sociétales (les évolutions climatiques par exemple), autrement dit de se projeter du présent dans le futur quand jusqu'alors on s'en tenait surtout aux reconstitutions du passé en s'aidant du présent. C'est dans ce contexte que nous voulons questionner les "notions" de catastrophe et de catastrophisme, mettre en regard la signification qu'elles prennent chez les profanes (les élèves) et chez les scientifiques (les géologues).

Notre étude porte d'abord attention à la théorisation du catastrophisme faite par les scientifiques dans un jeu dialectique avec l'actualisme, comment ceux-ci évacuent les "causes" extraordinaires en nature ou en intensité (des "catastrophes"), comment ils les réintroduisent lorsque l'actualisme atteint ses limites (Hooykaas, 1970 ; Babin, 2005). Elle caractérise ensuite la manière dont des scientifiques anciens (Agassiz, 1837) et actuels (Courtillot, 2009) mobilisent le couple "actualisme-catastrophisme" dans des questions scientifiquement, voire socialement vives (les évolutions climatiques).

Nous nous intéressons enfin aux approches spontanées qu'ont de ces questions les élèves de collège et de lycée. En nous appuyant sur leurs productions orales et écrites mais aussi sur des moments de débat où ils peuvent développer et confronter leurs explications, nous précisons leur rapport aux "catastrophes" et au "catastrophisme". Nous montrons leur forte tendance à produire de "petites histoires géologiques" (*storytelling*) et à enchaîner des causes et des événements *ad hoc* (Orange Ravachol, 2012). Ils restent dans la pensée commune, où catastrophisme naïf et anachronisme sont terriblement efficaces, par les économies de raisonnement qu'ils permettent et la variété des problèmes où ils peuvent s'exercer.

Agassiz, L. (1837). Discours prononcé à l'ouverture des séances Société Helvétique des Sciences Naturelles, Neuchâtel le 24 Juillet 1837. *Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles*

Babin, C. (2005). *Autour du catastrophisme*. Paris : Vuibert-ADAPT

Courtillot, V. (2009). Nouveau voyage au centre de la Terre. Paris : Odile Jacob Hooykaas, R. (1970). Continuité et discontinuité en géologie et biologie. Paris: Seuil

Orange Ravachol, D. (2012). Didactique des sciences de la vie et de la Terre, entre phénomènes et événements. Rennes : PUR

**Mots-Clés:** actualisme, catastrophisme, école, évolutions climatiques, storytelling

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>✉</sup>Auteur correspondant: christian.orange@ulb.ac.be

## Quels attendus méthodologiques pour résoudre des problèmes historiques dans l'enseignement des Sciences de la Terre ?

Fabienne Paulin \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sciences, société, historicité, éducation et pratiques (S2HEP) – Université Claude Bernard - Lyon I – Campus LyonTech-la Doua Bâtiment La Pagode 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69622 Villeurbanne Cedex, France

Les sciences de la Terre sont aujourd’hui pensées comme des sciences travaillant à la fois des problèmes fonctionnalistes (comment " marche " une dorsale océanique?) et des problèmes historiques (comment s'est formée la chaîne alpine ?) (Gould, 1998 ; Gohau, 2002 ; Orange Ravachol, 2012). Ces deux pôles sont présents et rappelés dans les objectifs des programmes d'enseignement qui présentent, les sciences de la Terre (comme les sciences du vivant) comme des sciences construisant " à partir de méthodes d'argumentation rigoureuses fondées sur l'observation du monde, une explication cohérente de son état, de son fonctionnement et de son histoire ". (Introduction générale des programmes du secondaire, 2010) Les approches historiques et fonctionnalistes sont pertinentes à travailler conjointement dans le sens où elles mobilisent des modes de raisonnement et de validation qui balaien un large spectre épistémologique des sciences de la nature qui est à maîtriser pour un apprentissage scientifique sérieux.

Cependant les sciences historiques et leurs modalités, bien que mentionnées, sont actuellement peu identifiables dans les programmes scolaires qui privilient les problèmes fonctionnalistes et les approches expérimentales en laboratoire (Paulin, 2018). Les sciences de la Terre nous semblent pourtant un domaine privilégié pour aborder des problèmes historiques qui permettent de travailler notamment deux concepts indispensables que sont le temps long ou " profond " et la contingence historique (Gould, 2002).

Dans ce contexte de moindre visibilité de la géologie historique quelles sont les démarches attendues vis à vis des problèmes historiques ?

Depuis 2013, les élèves de terminales S sont évalués sur leur capacité expérimentale (ECE) lors d'un examen pratique (durée :1 heure) dont la note est intégrée à la note finale de SVT du baccalauréat S. Depuis cette année, les énoncés des sujets sont en accès libre sur le site EDUSCOL (site officiel de l'Éducation Nationale) avant l'épreuve. Au nombre de 80 ils sont élaborés par des professeurs et validés par l'inspection générale. Nous nous proposons de conduire une analyse didactique et épistémologique des 8 sujets de géologie historique de ce corpus pour étudier, au-delà des seuls énoncés programmatiques peu prolixes sur la question, les attendus institutionnels méthodologiques (et épistémologiques) en termes de géologie historique.

**Mots-Clés:** géologie historique, enseignement

\*Intervenant

## Roches, minéraux et paysages de la série du Chavanon (Massif Central, France)

Vincent Thiery <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai (IMT Lille Douai) -, 941 rue Charles Bourseul, CS 10838, 59508 Douai Cédex – France

La série du Chavanon, situé à proximité de la ville d'Ussel dans le Massif Central, reste relativement méconnue et peu étudiée par rapport à certains secteurs plus classiques (Sioule, Haut Allier...) de cette région.

Constituée pour l'essentiel de migmatites, gneiss et micaschistes, elle s'avère en effet relativement monotone du point de vue des lithologies. Toutefois, c'est dans ses micaschistes qu'ont été décrits les premiers microdiamants métamorphiques du territoire métropolitain. Ainsi, en premier lieu, les géologues trouveront matière à étudier les différentes lithologies, les relations structurales entre unités, l'altération des roches, les ressources minérales...

Malgré des conditions d'affleurement pas toujours idéales, cette série présente un grand intérêt du point de vue du patrimoine géologique dans tous les sens du terme, qu'il s'agisse de géologie fondamentale, géomorphologie et géologie de l'ingénieur.

Les marbres (calcaires métamorphiques) de la série du Chavanon constituent une lithologie originale et ont très tôt été étudiés par les plus illustres géologues, notamment dans l'explication de la carte géologique de la France de 1841 (Dufrénoy & De Beaumont).

Bien que cette région ne soit pas caractérisée par de riches gisements miniers (hormis le charbon, activement exploité dans le bassin de Messeix-Singles jusqu'en 1988), de nombreux indices constellent la série du Chavanon, certains d'entre eux ont fait l'objet de travaux de recherche parfois poussés, d'autres ont donné lieu à des exploitations minières généralement anciennes. Ainsi, l'antimoine est présent (ancienne mine de Savennes par exemple), de même que le plomb (ancienne mine de Joursac). Quelques indices aurifères sont connus. Même si l'on ne s'agit pas d'une substance accessible ou énergétique, notons que le marbre (calcaire métamorphique) a été exploité depuis au moins la première moitié du 19<sup>e</sup> siècle.

Du point de vue des curiosités liées à la géologie, certaines croyances populaires locales autour d'un affleurement particulier, d'un promontoire rocheux... permettent de lier la découverte de la géologie au folklore régional.

Enfin, l'aménagement historique du territoire (géologie de l'ingénieur) pour franchir cette région montagneuse est digne d'intérêt et est intimement lié à la géologie et la géomorphologie.

**Mots-Clés:** Série du Chavanon, géologie grand public, vulgarisation, paysage

<sup>\*</sup>Intervenant



## 10.2 Géologie et Grande Guerre

## La Première Guerre mondiale et ses conséquences sur la vie des sociétés géologiques en Belgique

Annick Anceau <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Julien Denayer <sup>2</sup>

<sup>1</sup> University of Liège, GeMMe, Mineral Resources Geo-Imaging, Quartier Polytech 1, Allée de la Découverte 9, B52/3, 4000 Liège, Belgium – Belgique

<sup>2</sup> University of Liège, Evolution Diversity Dynamics Lab, Allée du Six Août B18, 4000 Liège, Belgium – Belgique

L'entrée des troupes allemandes en Belgique le 4 août 1914 entraîne l'arrêt de toutes les activités scientifiques de la Société Géologique de Belgique, de la Société belge de Géologie mais aussi une réduction des activités de l'Académie royale de Belgique. L'Université de Liège est occupée jusqu'en 1918 et aucun enseignement ni recherche ne s'y déroule. Durant les années de guerre, la vie intellectuelle en Belgique est presque entièrement suspendue.

Au sortir de la guerre, le ressenti des belges mais aussi des Alliés contre les Etats centraux est très fort. Par protestation contre l'attitude de l'Allemagne à l'égard de la Belgique et en réaction au manifeste des 93 intellectuels allemands, les sociétés scientifiques internationales et belges rompent leurs relations avec les Etats centraux et excluent tous les membres appartenant à ces Etats. Elles suppriment également l'échange des publications avec les institutions de ces pays.

La rupture des relations scientifiques amène à la création, en 1920, d'une bibliographie géologique mondiale dont l'objectif est de remplacer le *Geologisches Zentralblatt*, que "ses origines allemandes condamnent à perdre toute clientèle en pays alliés". Cette nouvelle publication, la *Revue de géologie et des sciences connexes*, devait éviter "aux intellectuels alliés l'humiliation de renouer des relations justement rompues". Elle est publiée à Liège par la Société Géologique de Belgique. La bibliographie des Etats centraux n'est pas rédigée par leurs ressortissants mais les travaux publiés dans ces pays sont tout de même dépouillés dans la revue.

Lors du Congrès Géologique International de 1913 à Toronto, la Belgique est désignée pour organiser la XIII<sup>e</sup> Session de ce congrès en 1917. Cette Session n'a pu avoir lieu qu'en août 1922. Dans la première circulaire envoyée en novembre 1921, il est précisé que "faisant usage des pouvoirs qui lui ont été reconnus dans la réunion tenue à Londres en 1921, ..., le Comité d'organisation de la XIII<sup>e</sup> Session a décidé de ne pas agréer les demandes d'inscription qui émaneraient de ressortissants des pays qui ont fait la guerre à la Belgique, au mépris des traités". Aucun géologue, géographe ou ingénieur des mines allemand, autrichien, hongrois ou turc ne prend donc part à ce congrès. Le français et l'anglais sont les langues officielles du Congrès, l'allemand étant banni.

Les relations scientifiques avec les anciennes puissances ennemis ne reprendront que dans la seconde moitié des années 1920.

**Mots-Clés:** Première Guerre mondiale, relations scientifiques internationales, boycott, géologie, Belgique

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>✉</sup>Auteur correspondant: a.anceau@uliege.be

## Achtung die chti-geologuen ! Les géologues lillois et la géologie à Lille durant la Première Guerre mondiale

Patrick Auguste <sup>\*1,2</sup>

<sup>1</sup> Université de Lille Sciences et Technologies – CNRS : UMR8198 – France

<sup>2</sup> Laboratoire Evolution, Ecologie et Paléontologie – CNRS : UMR8198 – France

Durant quatre ans d'octobre 1914 à octobre 1918, l'Université de Lille va avoir le triste privilège d'être la seule université française occupée par les Allemands. Soumis aux mêmes contraintes drastiques que la population à une occupation très dure et aux destructions causées par la proximité de la ville de la ligne de front, le personnel universitaire des différentes facultés lilloises va tenter malgré tout de continuer à enseigner. A la différence des autres instituts, l'Institut de Géologie et la Société Géologique du Nord qui y est implantée vont avoir l'opportunité de poursuivre en partie leurs activités. La géologie lilloise est alors mondialement reconnue à l'époque, mais quatre ans de ténèbres vont marquées un ralentissement notable. Devenu le plus important centre du service géologique des armées allemandes fondé depuis peu, la *Kriegsgeologie*, l'Institut de Géologie avec son très riche fond de cartes, de minéraux et fossiles, va jouer un rôle crucial dans la conduite de la guerre des tranchées sur le front ouest. Plusieurs événements illustrent cette période, comme la tragique disparition du père fondateur de la Géologie lilloise Jules Gosselet, la destruction d'une partie des collections, la présence continue de Charles Barrois et de son adjoint Pierre Pruvost et leurs relations avec les occupants, l'épisode de la guerre des mines dans les Flandres face aux géologues du Commonwealth,... La nature des relations nouées entre les géologues allemands et leur chef Walter Kranz avec C. Barrois demeure assez ambiguë avec des zones d'ombres qui ne sont toujours pas éclaircies. Ces questions autour de la présence de C. Barrois sur place et de sa possible collaboration avec l'équipe de W. Krantz vont faire l'objet de mise à l'index de celui-ci par toute la communauté dès la fin de la guerre. Mais cette présence constante de C. Barrois et de quelques autres géologues à Lille durant toute la durée de l'occupation va aussi permettre dès janvier 1919 à la géologie de revenir très vite sur le devant de la scène scientifique internationale.

**Mots-Clés:** Première guerre Mondiale, Géologie, Kriegsgeologie, Charles Barrois

<sup>\*</sup>Intervenant

## Les carrières souterraines d'Arras (Pas-de-Calais) et la Grande Guerre

Françoise Bergerat <sup>\*1</sup>, Francis Amédro <sup>2</sup>, Alain Jacques <sup>3</sup>, Francis Robaszynski <sup>4</sup>, Sara Vandycke <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTEPI) – Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7193, Sorbonne-université – France

<sup>2</sup> Biogéosciences – Université de Bourgogne, CNRS : UMR6282 – 6 Bvd Gabriel 21000 DIJON, France

<sup>3</sup> Service archéologique d'Arras – Ville d'Arras – France

<sup>4</sup> Université de Mons (UMons) – 20, place du Parc, B7000 Mons, Belgique

La craie blanche coniacienne a été exploitée à Arras depuis l'Antiquité et surtout au XVI<sup>e</sup> et au XVII<sup>e</sup> siècle dans de vastes carrières souterraines où son extraction se faisait par "chambre et piliers". Fin 1916, la ville fut pressentie pour constituer la base de départ d'une offensive de diversion, quelques jours avant l'attaque du Chemin des Dames. L'état-major britannique élabora une tactique innovante : utiliser les carrières, aménagées et reliées entre elles, pour permettre aux combattants de surgir devant les premières lignes ennemis sans avoir subi de lourdes pertes en traversant le *no man's land*. Le lundi 9 avril 1917, à 5h30 du matin, les troupes stationnées dans les souterrains sortirent ainsi à quelques mètres de la 1<sup>ère</sup> ligne allemande.

Une étude tectonique des carrières du faubourg de Ronville a mis en évidence une organisation des fractures de la craie selon deux directions principales N 105°-125°E (failles normales et diaclases subverticales) et N160°-180°E (décrochements sénestres subverticaux). Les carriers avaient certainement dû utiliser ces fractures naturelles pour extraire la roche. Le réseau plus ou moins régulier de galeries et piliers, de même que la planéité des côtés de piliers ou des murs des carrières ont aussi dû constituer un atout pour l'aménagement de ces cavités en cantonnement. Les directions de fracturation se reflètent très clairement sur les plans réalisés par les Anglais pendant la guerre.

Deux coupes litho-stratigraphiques ont été levées, l'une dans les Boves (place des Héros), l'autre dans la carrière Auckland (faubourg de Ronville). On se trouve au sein même des craies à silex de l'étage Coniacien, environ vingt mètres au-dessus des craies à silex et hardgrounds du Turonien et environ dix mètres en dessous du Santonien. Les galeries de liaison creusées entre les carrières mesurent en moyenne 2,50 m à 3 m de haut ; dans le tunnel situé entre les carrière Auckland et Wellington, les sapeurs néo-zélandais ont utilisé comme toit des galeries un lit de gros silex pluridécimétriques jointifs, conférant ainsi à ce tunnel une grande solidité et un faible risque d'éboulement.

La craie a aussi conservé d'autres traces du passage des armées du Commonwealth et plusieurs centaines de graffitis, dessins, sculptures et gravures ont été relevés dans les carrières d'Arras. Ils constituent, à l'heure actuelle, un témoignage concret de cet épisode majeur de l'histoire d'Arras et des préparatifs de la bataille d'Arras.

**Mots-Clés:** Guerre 14, 18, Craie, Carrières souterraines, Bataille d'Arras, Fractures, Coniacien

\*Intervenant

## Le primat de la géologie dans la géographie militaire française (1871-1914)

Philippe Boulanger \*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Société de géographie de Paris – 35, rue de la Marinière 91600 Savigny sur Orge, France

<sup>2</sup> Université Paris 8, Vincennes-Saint-Denis (UP8) – Centre de recherche et d'analyse géopolitiques – France

La géographie constitue un savoir stratégique, opérationnel et tactique qui est longtemps resté empirique. Il tend à se construire plus précisément à partir du XIXe siècle en Europe, notamment en s'appuyant sur la géologie. En France, la géographie militaire forme un véritable courant de pensée après la défaite face à la Prusse en 1870 dont l'intérêt est de se préparer à la prochaine guerre face à l'Allemagne. Ses théoriciens tendent à concevoir des méthodes scientifiques et des finalités qui doivent la rendre opérationnelle. La géologie est ainsi considérée comme l'approche fondamentale, mais pas unique, de la manière de penser le territoire à des fins militaires jusqu'à la Grande Guerre. Des théories élaborées sont diffusées dans de multiples études comme enseignées dans les écoles militaires. Comment le primat de la géologie s'est-il imposé dans la géographie militaire française jusqu'en 1914 ?

**Mots-Clés:** Géographie militaire française, géologie, pensée géographique, guerre

\*Intervenant



## Sauve qui peut, 1914-1918 : les collections de géologie et de paléontologie en péril...

Jessie Cuvelier <sup>\*ψ1</sup>, Annick Anceau <sup>2</sup>, Julien Denayer <sup>3</sup>, Thierry Oudoire <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Évolution, Écologie et Paléontologie (Evo-Eco-Paleo) - UMR 8198, bâtiment SN5 (Sciences de la Terre), avenue Paul Langevin, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex (Evo-Eco-Paléo) - Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique - France

<sup>2</sup> University of Liège, GeMMe, Mineral Resources Geo-Imaging, Quartier Polytech 1, Allée de la Découverte 9, B52/3, 4000 Liège- Belgique

<sup>3</sup> University of Liège, Evolution Diversity Dynamics Lab, Allée du Six Août B18, 4000 Liège, Belgium - Belgique

<sup>4</sup> Musée d'Histoire Naturelle de Lille -- France

D'août 1914 à novembre 1918, la Belgique, ainsi qu'une partie de la France, sont occupées par l'armée allemande pendant quatre longues années, synonymes de restrictions, interdictions et destructions. La ligne de front où s'installe une guerre des tranchées se stabilise en novembre 1914, à une vingtaine de kilomètres à l'ouest de Lille. Les allemands réquisitionnent alors les bâtiments publics pour installer leurs troupes et instaurent une administration, les Kommandanturs.

Cent ans après ce conflit, la mémoire collective retient d'importantes pertes en vie humaine pendant que des études récentes mettent au jour des histoires méconnues. Dès le début de la guerre, le patrimoine national a présenté un enjeu diplomatique, accentué par une propagande grandissante : doit-on protéger le patrimoine des pays envahis des progrès de l'armement, récupérer des biens spoliés ou s'accaparer de la richesse du pays ?

La création du service du Kunstschatz par les Allemands montre l'intérêt de ces derniers pour les œuvres d'art et les objets archéologiques. Malheureusement, cela n'a pas été le cas pour les collections d'histoire naturelle, conservées par les universités. Comme à Lille ou à Liège, la sauvegarde de ces collections dépend des péripeties des laboratoires.

Le Musée de Géologie de l'Université de Lille est géré par un personnel restreint pendant toute la guerre et subit deux destructions majeures, touché par un obus lors de la prise de la ville de Lille par les allemands les 11 et 12 octobre 1914 puis par une déflagration dramatique dans la nuit du 11 janvier 1916. Jules Gosselet, Charles Barrois, Pierre Pruvost et Georges Dubois remédient à ce désastre par un long travail de tri.

Les allemands envahissent les locaux de l'Université de Liège en août 1914, dès le début de la guerre. Certains membres du personnel mettent en sécurité des pièces importantes comme les os de l'homme de Spy. Les collections de géologie et de paléontologie sont partiellement pillées par l'armée ennemie, dont des officiers haut-gradés. Des photographies prises en 1917 par l'administration allemande et en novembre 1918 à la demande de l'administrateur de l'Université attestent aussi des saccages dans les bibliothèques, les laboratoires et au mobilier.

**Mots-Clés:** Première Guerre Mondiale, collections, patrimoine, géologie, paléontologie, France, Belgique

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: Jessie.Cuvelier@univ-lille1.fr

## Géologie et organisation spatiale des réseaux de défense de la Grande Guerre sur le front ouest (Pays rémois, Champagne et Argonne) - Apport des Plans directeurs et du SIG

Alain Devos <sup>\*1</sup>, Pierre Taborelli <sup>1</sup>, Sébastien Laratte <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Groupe d'Étude sur les Géomatériaux et Environnements Naturels, Anthropiques et Archéologiques - EA 3795 (GEGENAA) – Université de Reims Champagne-Ardenne : EA3795 – France

La Grande Guerre est principalement marquée sur le front ouest par une guerre de position (durant 40 mois sur les 51 mois du conflit) le long de la zone de front occidental, sur 750 km des Flandres à l'Alsace. L'objectif de cette présentation est de comprendre le rôle de la géologie sur l'organisation spatiale des réseaux de défense du front, trop souvent représenté sous la forme d'une ligne. Une analyse spatiale sous Système d'Information Géographique (SIG) des Plans directeurs de 1918, sur les 115 km de front en Champagne-Ardenne est menée dans le pays rémois (contact Tertiaire/Crétacé), la Champagne sèche (craie du Crétacé supérieur), le Village d'Aisne (formations tendres du Turonien inférieur) et dans l'Argonne (gaize et argiles albo-cénomanianes). Le traitement des résultats croisés à des indices morphométriques, montre clairement le contrôle des conditions géomorphologiques sur la largeur du no man's land, les densités de tranchées et de boyaux (13 000 km), l'épaisseur et la structure des réseaux de défense (organisation linéaire en positions/lignes et cellulaire en réduit/centres de défense sur 20 à 40 km).

Dans le Pays rémois, caractérisé par une plaine dégagée, parsemée de buttes témoins et d'avant buttes, dominée par la côte d'Ile de France, le dispositif de défense est profond car en l'absence de couvert et avec des sites d'observation remarquables, le réseau de défense répond à la portée de l'artillerie par des positions très espacées.

Dans la Champagne sèche, le front s'organise autour des crêtes des Monts de Champagne (guerre d'observatoires, guerre des mines) déterminant les plus fortes densités de tranchées et de boyaux. Dans le Village d'Aisne, l'hydromorphie du terrain, limite considérablement cette densité. Enfin, en Argonne, la vigueur des reliefs, et la couverture forestière sont favorables à la guerre des mines et à l'artillerie de tranchées mais sont différemment exploitées par les belligérants (première position allemande hypertrophiée sans profondeur, organisation classique en 4 positions françaises). Cette contribution témoigne de l'hétérogénéité spatiale des potentialités de valorisation patrimoniale, inhérente aux conditions géologiques et géomorphologiques qui concourent également à différents degrés de conservation des polémo-paysages.

**Mots-Clés:** Grande Guerre, Plans directeurs, SIG, Côte d'Ile de France, Champagne crayeuse, Village d'Aisne, gaize d'Argonne.

\*Intervenant

## Apport des Plans directeurs, du SIG et du traitement automatique de données lidar pour l'étude des " polémo-paysages " de la Grande Guerre en Argonne

Alain Devos <sup>\*</sup>, Pierre Taborelli <sup>1</sup>, Sébastien Laratte <sup>ψ1</sup>, Jean-Paul Deroin <sup>φ1</sup>, Jérôme Brénot <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Groupe d'Étude sur les Géomatériaux et Environnements Naturels, Anthropiques et Archéologiques - EA 3795 (GEGENAA) – Université de Reims Champagne-Ardenne : EA3795 – France

<sup>2</sup> Eveha – La Chapelle Saint-Luc – France

La Grande Guerre a fortement marqué les paysages ("polémo-paysages") le long du front occidental sur 750 km de la mer du Nord en Belgique à la frontière franco-suisse. L'objet de cette contribution porte sur les modèles hérités du conflit (" polémo-formes "), leur typologie et leur organisation spatiale, qui constituent un potentiel archéologique majeur. Le lidar habituellement utilisé sur des sites avec une approche plurisectorielle sans vision multiscalaire, est ici utilisé à travers l'ensemble du dispositif de défense allemand et français connu grâce aux plans directeurs de 1918 et leur traitement sous SIG. Ce dernier montre que sur les 13 000 km de tranchées et de boyaux, des 115 km de ligne de front de Champagne-Ardenne, la zone de front s'organise en positions, lignes et réduits entre 20 et 40 km d'épaisseur. Une mission aérienne réalisée en 2014 sous couverture forestière sur une bande de 17 km couvrant seulement 0,6 % de la ligne de front en Argonne embrasse l'intégralité des réseaux de défense allemands et français des positions de cantonnement aux no man's land. La haute résolution (8 à 12 points par m<sup>2</sup>) permet de révéler de très nombreuses formes de terrain dont le traitement automatique et la caractérisation morphométrique discriminent des modèles anté-syn et post Grande Guerre. L'approche spatiale sous SIG par croisement des résultats issus du traitement des Plans directeurs et du lidar, permet de calculer leur degré de conservation qui dépend de la gestion sylvicole des zones rouges d'après-guerre. Des campagnes de prospections archéologiques réalisées dans les premières positions (Bois de la Gruerie à Servon-Melzicourt) et à l'arrière dans un camp de repos (Borrieswald à Apremont-sur-Aire) confirment l'hétérogénéité des " polémo-formes " et du mobilier de la Grande Guerre, inhérente à l'organisation spatiale des réseaux de défense.

**Mots-Clés:** Grande Guerre, " polémo, formes ", SIG, traitement automatique, lidar, Plans directeurs, Argonne.

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: sebastien.laratte@univ-reims.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: jean-paul.deroin@univ-reims.fr

## Traces des bombardements de la seconde guerre mondiale sur les fonds marins, exemple de la Grande Rade de Toulon

Thierry Garlan <sup>\*1</sup>, Xavier Mathias <sup>1</sup>, Emeric Brenon <sup>1</sup>, Nathalie Favretto Cristini <sup>2</sup>, Anne Deschamps <sup>3</sup>, Olivier Morio <sup>1</sup>, Patrick Guyomard <sup>1</sup>, Eric Beucler <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Shom (Shom) - EPA Shom - 13 rue du Chatellier 29200 BREST, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique [Marseille] (LMA) - Aix Marseille Université : UMR7031, Ecole Centrale de Marseille : UMR7031, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7031 - France

<sup>3</sup> Université Nice Sophia Antipolis [UNS] : EA3820 - CNRS - France

<sup>4</sup> Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes - Université de Nantes, INSU, CNRS UMR6112, Fr

L'ANR POSA étudie l'énergie sismique libérée par l'explosion des engins explosifs lors de leur destruction en mer. Ce projet repose sur l'enregistrement de mesures sismologiques et acoustiques lors d'actions de contre-minage, effectuées par la marine, sur les engins de la seconde guerre mondiale trouvés sur les fonds marins et ne pouvant être déplacés. Afin d'étudier la propagation d'ondes sismiques par des sources contrôlées (localisation et énergie explosive) deux campagnes de destructions d'engins sont réalisées dans le cadre de ce projet. Ces mesures sont comparées à une modélisation numérique de la propagation des ondes réalisée à partir du code SPECFEM et d'un modèle géologique 3D comprenant les caractéristiques physiques des sédiments et des roches sous-jacentes. Ce projet s'est tout d'abord concentré sur cette représentation de l'environnement 3D à partir de levés réalisés pour ce projet. Les mesures in-situ ont alors révélé plusieurs centaines de figures circulaires aux caractéristiques très spécifiques, qui les différencient nettement des autres figures sédimentaires, biologiques et géologiques rencontrées sur les fonds marins. Leur diamètre est compris entre 10 et 130 m, elles sont observées de 10 à 250 m de profondeur, et la zone d'étude comporte en moyenne près de 30 cercles par kilomètre carré. Ces cercles, détectés sur l'imagerie acoustique SMF et sonar latéral, ne correspondent à aucune modification de la morphologie du fond. Leur analyse montre qu'ils ont été générés par l'explosion d'engins explosifs à différentes périodes. Les plus anciennes résultent nécessairement des bombes larguées en 1940 et 1944, en particulier lors du débarquement des forces alliées dans la région de Toulon. Ces figures sédimentaires anthropiques originales et leurs différences par rapport aux autres structures circulaires observées sur le fond marin sont présentées. Leur répartition et quelques alignements pourraient permettre de cartographier les zones de bombardement. La persistance à long terme de ces structures permet quand à elle de caractériser une absence de dynamique sédimentaire. Ce dernier point expliquerait la quasi-absence de telles figures aux abords des plages de Normandie où seuls quelques cercles similaires ont été observés.

**Mots-Clés:** Séimentologie marine, Blast marks, Contre minage, ANR POSA

\*Intervenant

## Les collines d'Artois - Réactivation tectonique

Franck Hanot <sup>\*ψ1</sup>, Françoise Bergerat <sup>φ2</sup>

<sup>1</sup> CDP-Consulting – Indépendant – France

<sup>2</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTEPI) – Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7193 – France

Les collines d'Artois constituent la limite entre le Bassin parisien et la plaine des Flandres. Cet ensemble de collines, dont l'altitude dépasse 100 mètres, est orienté nord-ouest – sud-est. Leur topographie particulière est directement liée à la géologie et à l'existence de failles qui décalent les terrains de surface. Cette géologie contribua largement à faire de l'Artois un secteur stratégique du front occidental de la Grande Guerre.

Le schéma de faille relativement simple au nord d'Arras, avec la faille de Marqueffles, se complexifie vers l'ouest avec le relais d'autres accidents importants (faille de Ruitz, faille de Pernes). Ces failles, subverticales à proximité de la surface, mettent à l'affleurement les terrains du Dévonien (Pernes, Dennebrœucq) et décalent la surface d'érosion post-hercynienne recouverte directement par les terrains du Cénomanien.

Elles se situent au voisinage de la zone d'émergence sous couverture de la faille du Midi. Ce chevauchement régional date de phase asturienne il y a environ 310 millions d'années. Les terrains du Dévonien viennent chevaucher les terrains houillers du Carbonifère. À l'est d'Arras la faille du Midi montre une géométrie régulière avec un plongement régulier sans qu'aucune faille verticale postérieure ne l'affecte. À l'ouest, la faille se verticalise, provoquant le même contact anormal et limitant le Houiller (région de Béthune et Aire) mais dans contexte structural faillé.

La question posée concerne la relation entre les failles affectant la couverture et les failles profondes. Leur réactivation est récente puis que le tertiaire (Éocène inférieur) est décalé. Le lien avec les failles profondes ne peut être éclairé que par la sismique réflexion.

L'amélioration de la qualité du modèle géologique produit est portée par deux voies :

- Une séquence de traitement moderne intégrant la modélisation des corrections statiques de surface ainsi que des modèles de migration avant addition adaptés.
- Une interprétation itérative intégrant les informations géologiques de surface et le pointé de la sismique.

**Mots-Clés:** Artois, héritage tectonique, faille du Midi, faille de Marqueffles

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: f.hanot@cdpconsulting.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: francoise.bergerat@umpc.fr

## Trois collines d'Artois, trois hauts lieux de la Grande Guerre

Franck Hanot <sup>\*ψ1</sup>, Françoise Bergerat <sup>φ2</sup>, Frédéric Simien <sup>§3</sup>

<sup>1</sup> CDP-Consulting – Indépendant – France

<sup>2</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTeP) – Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7193 – France

<sup>3</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique – France

Très proches d'Arras, trois collines séparées de quelques kilomètres ont marqué la Grande Guerre. Leur structure géologique très différente a influencé les combats.

La colline de *Notre Dame de Lorette* est le siège de combats meurtriers durant les 3 batailles d'Artois (Octobre 1914, 9 Mai au 19 Juin 1915 ,25 Septembre -8 Octobre 1915) Le plateau est un charnier. La boue de notre Dame de Lorette fut souvent mentionnée en particulier sur le versant nord de la colline. Cela s'explique par la présence de la faille de Marqueffles qui coupe longitudinalement la colline et préserve au nord un compartiment bas d'argiles sableuses landénienes (Thanétien, Yprésien).

Ces mêmes terrains tertiaires existent également plus au Sud-Ouest dans la région de *Mont Saint Eloi* sous forme de buttes témoins recouvrant la craie. Les deux tours de l'abbaye de style classique, bâtie sur un de ces promontoires dominent la plaine. Considérées à juste raison comme point d'observation par les allemands, elles furent pilonnées mais résistèrent. Elles sont en effet construites en grès tertiaire très résistant tiré de carrières proches.

L'échec relatif des batailles d'Artois en 1915 verra l'effort se porter sur la guerre des mines surtout à partir de 1916. La craie est le terrain idéal pour le creusement des galeries et cette dernière épaisse charpente toute les collines d'Artois. C'est à la fois une roche facile à creuser et dont la tenue en galerie est satisfaisante. La seule restriction est la présence d'eau (nappe phréatique), la craie doit être dénoyée ce qui est le cas sous les collines et les flancs de plateau. Reprendre l'éperon ou *crête de Vimy* est l'objectif premier. Le moyen d'y parvenir et de détruire l'ennemi par le dessous. La ligne Souchez – Neuville Saint Vaast (vallée des zouaves) sera le point de départ, au pied et à l'ouest de l'éperon, d'une dizaine de tunnels creusés par les britanniques et aboutissant sous les lignes allemandes. Cette préparation et cette guerre des mines conditionneront le succès de l'offensive canadienne de Pâques 1917.

**Mots-Clés:** Artois, craie, argiles, faille de Marqueffles, point d'observation, guerre de mines

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: f.hanot@cdpconsulting.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: francoise.bergerat@sorbonne-universite.fr

<sup>§</sup>Auteur correspondant: f.simien@brgm.fr

## Sous les lignes de Front - Regards géologiques sur la Grande Guerre

Franck Hanot <sup>\*1</sup>, Frédéric Simien <sup>\*ψ2</sup>, Nicolas Charles <sup>2</sup>, Joséphine Vicelli <sup>1</sup>

<sup>1</sup> CDPconsulting (CDP) – 7 boulevard Chanzy 41000 BLOIS, France

<sup>2</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique – France

Parcourir les 700 kilomètres du front de l'ouest est une expérience instructive à divers titres. En effet, les différentes zones du front occidental : Flandres, Artois, Picardie, Champagne, Argonne, Verdun, Vosges et Alsace présentent toutes des environnements très différents, hérités de l'histoire géologique du bassin parisien. A partir d'Octobre 1914, avec la mise place de la guerre de position, pour la première fois, la géologie prend une nouvelle importance. Elle oblige les belligérants à sélectionner les secteurs à éviter : zones marécageuses, rivières... et surtout à rechercher ce qu'il faut maîtriser, comme les abris naturels et les points hauts. La conquête des sommets, même modestes, devient un objectif prioritaire : le mont Kemmel, Notre-Dame-de-Lorette, le Chemin des Dames, les monts de Champagne, la Butte de Vauquois, la Crête des Éparges... Ils permettent de surveiller l'ennemi et contrôler les voies de circulation. L'espace souterrain devient particulièrement convoité, à la fois pour se réfugier en creusant des abris qui atteignent la taille de casernements souterrains, et également pour atteindre et anéantir l'ennemi en prenant moins de risques qu'en surface.

Le parcours est illustré par une coupe géologique qui suit la ligne de front stabilisée en octobre 1914. Cette coupe nous renseigne sur les liens entre la Grande Guerre et les différents facteurs qui contraignent le déroulement des combats. Au même titre que la topographie et la nature des roches, l'eau est un facteur majeur que doit prendre en compte le militaire. Elle est une ennemie quand il faut l'évacuer des tranchées ou l'éviter dans les creusements de galeries (Hill 60). La guerre des mines a pris toute son importance là où l'eau est absente et suffisamment profonde (la Somme, Vauquois, Chapelotte). Elle peut être vitale quand la soif constraint à des corvées d'eau épuisantes comme par exemple en Champagne, ou à boire l'eau croupie des trous d'obus. Dans la Somme et le Nord de la France, les alliés anticipent en puisant par forage l'eau de la nappe phréatique de la Craie. Leurs connaissances en hydrogéologie s'avèrent très utiles. L'eau en surface représente également une arme. Il s'agit par exemple des possibilités d'inondations comme cela s'est pratiqué dans les Flandres, de la présence de marais comme ceux de Saint-Gond (Marne), ou bien de canaux comme ceux des environs de Cambrai (Nord), ou de rivières comme la Somme.

Douze secteurs emblématiques, représentatifs des relations entre la géologie et la Grande Guerre, sont décrits de façon détaillée sous forme de blocs diagrammes détaillés et inédits. Ils illustrent les relations entre la morphologie des champs de bataille, la géologie et l'hydrogéologie en profondeur. Le cheminement le long de la ligne de front est donc matérialisé par une coupe couplant histoire et géologie qui relie entre elles ces douze portions du front tout en développant de façon succincte d'autres lieux illustrant le sujet.

**Mots-Clés:** Grande Guerre, Front, géologie, Craie, morphologie des champs de bataille, hydrogéologie

**Intervenant**

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: f.simien@brgm.fr

## 14-18: La géologie Ce fer de lance de la guerre souterraine

Daniel Hubé \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Ministère de l’écologie de l’Energie, du Développement durable et de l’Aménagement du territoire – France

La Grande Guerre est la première guerre totale, industrielle, de matériel. Elle reste celle de l’artillerie dont la puissance de feu n’eut de cesse d’augmenter durant le conflit ; face à ce déluge de feu et d’acier, les armées n’eurent d’autres alternatives que de s’enterrer pour se défendre mais aussi attaquer. Des octobre 1914, de vieilles tactiques obsidionales sont réexhumées. La guerre des mines. Elle est à la tranchée ce que le sous-marin est au cuirassé : venir apposer le plus discrètement possible, à l’extrême de galeries creusées, une puissante charge explosive sous la cuirasse pour la briser par le dessous. L’objectif est de créer des brèches dans les fortifications adverses, et, dans l’instant de panique, y lancer des assauts. A ce stratagème offensif, l’ennemi oppose un dispositif défensif par des écoutes, et une fois l’avancée adverse localisée, par le creusement de galerie de contre-mine ("camouflets"). Dans ce jeu du chat et de la souris chthonien, prend le dessus celui qui sait prendre le dessous, se traduisant au fil de la guerre par des réseaux de mine de plus en plus profonds et à l’usage de charges militaires de plus en plus puissantes. L’opération britannique dans le Saillant d’Ypres, du 7 juin 1917, avec la détonation de 19 mines totalisant 450 tonnes d’explosif, reste le coup d’éclat de la guerre souterraine. Elle est menée par un officier entreprenant conseillé par un éminent géologue australien qui va inverser le rapport de force avec les Allemands. Le conseil géologique est de prime importance dans la conduite de la guerre sous terre. Le challenge est de creuser au sec, le plus discrètement et le plus rapidement possible, à une profondeur suffisante pour résister aux détonations en surface. Des cartes de vitesse de propagation du son sont établies selon le type de roche, pour les écoutes. Les géologues étudient aussi la couleur des gravats afin de dissimuler des observateurs ennemis. Enfin, des équations sont établies pour estimer les charges nécessaires, pour obtenir les destructions escomptées en surface, en fonction du type de roche et de la profondeur. Ces travaux ne s’improvisent pas ; des cartes géologiques spéciales et totalement inédites sont dessinées pour identifier les terrains propices au minage. Fin 1917, la puissance de l’artillerie interdit tout assaut ; la guerre des mines s’éteint. Les Russes se souviendront à Stalingrad de 14-18. La tactique est encore utilisée par les rebelles syriens

**Mots-Clés:** Grande Guerre, géologie, mines, cartes

\*Intervenant

<sup>1</sup>Auteur correspondant: d.hube@brgm.fr

## Des cartes géologiques innovantes Traits d'union entre géologues et militaires

Daniel Hubé \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Ministère de l'énergie de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire – France

Au début du XXème siècle, 14-18 est une guerre d'un genre nouveau. D'une guerre de mouvement traditionnelle où n'importe que le relief, elle a imposé une guerre de siège inédite forçant ces hommes à s'enterrer pour vivre et survivre, pénétrant le monde souterrain inconnu des militaires. Les Alliés et les Allemands se battent sur une géologie qui leur est inconnue ; ils vont innover en créant des unités de géologues militaires spécifiques dont la tache est immense : chercher et sécuriser l'approvisionnement en eau, creuser abris et tranchées, conduire la guerre sous terre, rechercher des ressources minérales et énergétiques pour les complexes industrialo-militaires et l'effort de guerre. La Grande guerre est l'acte fondateur et traumatique de la géologie moderne et appliquée. Les cartes géologiques rassemblent sur plan les informations géologiques des terrains à l'affleurement. Les échelles, la précision et les informations des cartes géologiques existantes couvrant les territoires belge et français sont inadaptées à la guerre de siège et incompréhensibles pour les militaires, étranger à la discipline géologique. Pour ces soldats, il importe de savoir ce en quoi la nature des terrains est profitable ou préjudiciable à la conduite des opérations. Le conseil géologique est alors transmis aux militaires sur le théâtre des opérations par des cartes inédites, à petite échelle, basées sur la connaissance géologique du moment. Les géologues britanniques ayant conscience que cette information ne saurait suffire pour certaines opérations souterraines mènent, sous le feu des sondages et études géologiques spécifiques. Les cartes les plus utilisées et distribuées dans les armées sont celles de l'approvisionnement en eau potable, dans lesquelles les terrains sont identifiés selon leur propension à subvenir en qualité et quantité aux besoins des armées, les profondeurs à lesquelles les eaux doivent être recherchées, etc. D'autres jeux de cartes traitent de l'aptitude des terrains à être creusés ou, lorsque les terrains se saturent en eau, de leur capacité à supporter le passage de matériels lourds ou à absorber les obus sans qu'ils n'explosent. Les cartes établies par les géologues étaient devenues des outils d'aide à la décision pour les militaires, qui devaient au front peser les moyens de se battre et ceux nécessaires à l'aménagement de leurs fortifications. Ces cartes sont des documents exceptionnels. Elles nous rappellent à quel point faire tomber les cloisons est une solution vers l'innovation.

**Mots-Clés:** géologie, grande guerre, cartes

\*Intervenant

## Utilisation militaire de l'Oise et des canaux associés au cours de la Grande guerre

Elisabeth Nicot <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> Association des géologues du Bassin de Paris (AGBP) – Université Pierre et Marie Curie [UPMC] - Paris VI – France

Après la bataille de la Marne en septembre 1914, le reflux des armées allemandes sur la rive droite de l’Oise fait de cette vallée un axe névralgique qui ouvrait la " Porte de Paris ", selon l’expression de G. Clémenceau dans ses discours et son journal. L’Oise qui prend sa source à Chimay dans les Ardennes belges, recoupait la ligne de front un peu au sud de Noyon. De nombreuses écluses jalonnent son trajet : Précy-sur-Oise, Venette, Longueil-Annel où se trouve le musée de la " Cité des bateliers ", Pont l’Évêque... L’Aisne, son affluent majeur, confluence à Choisy-au-Bac en amont de Compiègne et donne accès à la Champagne. L’Oise est aussi un maillon essentiel dans le réseau des canaux qui, du nord de la France vers le centre du bassin parisien, assure les échanges industriels (charbon, coton, céréales). Deux petits affluents joueront un rôle important pendant la guerre : la Divette, au nord du massif de Thiescourt, jalon du front en 1914 et le Haut-Matz, vallée par laquelle les Allemands réaliseront une percée en juin 1918. Le réseau fluvial a servi de barrière défensive par la destruction des ponts ou des digues entraînant des inondations qui posent des problèmes pour l’avancée des troupes sur le terrain. Au gré des fluctuations du conflit, la vallée de l’Oise a été mise à profit pendant toute la Grande Guerre pour convoyer des denrées, du combustible, des matériaux et des munitions. Les péniches servent aussi au transport des blessés vers les hôpitaux. Il faut donc entretenir ce réseau, déblayer les produits de la destruction des ponts par les bombardements, renforcer les berges, reconstruire les ponts en les adaptant aux besoins des armées. Ces travaux ont été réalisés par les troupes du génie, notamment le corps des Pontonniers qui va développer une très grande variété de ponts. Très vite, le recours aux technologies issues du civil s’impose pour répondre au plus vite aux besoins et accélérer le rythme des reconstructions. La marine nationale, peu engagée sur les mers au début du conflit a développé, sous l’impulsion du Commandant Jehenne, une marine militaire fluviale en adaptant les équipements défensifs des bateaux et des ports sur des péniches. La facture de remise en état du réseau a été gigantesque mais a conduit aussi à la modernisation du réseau.

**Mots-Clés:** Mot, clés : la rivière Oise, canaux, destructions, ponts, utilisation militaire.

<sup>\*</sup>Intervenant

## Collections et zones rouges : apport des inventaires

Jérôme Thomas <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> Biogéosciences – Université de Bourgogne, CNRS : UMR6282 – 6 Bvd Gabriel 21000 DIJON, France

La Première Guerre mondiale a vu des millions de munitions déversées des Flandres à la Lorraine. Après guerre, certaines zones correspondant aux lignes de front des armées où sont concentrés les dommages majeurs ont été classées en zone rouge. En 1919, la zone rouge couvrait 178.511 ha, 13 départements français étaient classés pour tout ou partie en zone rouge : l'Aisne, les Ardennes, le Bas-Rhin, le Haut-Rhin, la Marne, la Meurthe-et-Moselle, la Meuse, la Moselle, le Nord, l'Oise, le Pas-de-Calais, la Seine-et-Marne et les Vosges. Seules quelques activités y sont autorisées : la sylviculture et le tourisme de mémoire. Toute fouille archéologique ou géologique y est formellement interdite, car les risques de faire exploser des munitions toujours opérationnelles (et certaines chimiques) sont trop grands (rappelons que les services de déminage poursuivent ce long travail de "désobusage" et détruisent entre 300 et 500 tonnes de munitions par an).

Dans ce contexte, l'utilisation des collections historiques est probablement la meilleure solution pour étudier ces zones impossibles d'accès. Pour ce faire, un consortium d'établissements est en plein développement et vise à informatiser et diffuser sur une seule et même plateforme le contenu des collections de sciences naturelles : Recolnat (Réseau des collections naturalistes). Depuis son lancement et en ce qui concerne la paléontologie, cette plateforme s'est essentiellement tournée vers l'information des types et figurés. Cependant, son développement permet le versement de l'intégralité des collections et accepte les spécimens sans statuts particuliers. Actuellement, nous estimons que les collections françaises conservent environ 20 millions de spécimens fossiles, dont moins de 1% ont été publiés (types ou figurés).

Le système de consultation (<https://explore.recolnat.org>) permet une recherche géographique des spécimens saisis. Il faut tout de même être prudent quant à l'utilisation de ces fossiles, car les principaux freins résident dans le manque de précision des données stratigraphiques et géographiques. Ce constat sur ces collections historiques nous pousse à essayer de mieux les documenter mais aussi nous incite à mieux constituer les collections contemporaines et donc fournir et conserver des données les plus précises possibles.

**Mots-Clés:** Collection, Paléontologie, Géopatrimoine

<sup>\*</sup>Intervenant

## " La guerre continue ". Les géologues et le premier Congrès géologique international de l'après-guerre

Philippe Le Vigouroux <sup>\*ψ1</sup>

<sup>1</sup> Centre François Viète : épistémologie, histoire des sciences et des techniques – Université de Nantes : EA1161 – France

Les géologues se réunissent en Congrès internationaux depuis 1878. La XII<sup>e</sup> session du Congrès géologique international s'est tenue à Toronto, au Canada, en 1913 et a répondu favorablement à l'invitation de la Belgique qui proposait de prendre en charge l'organisation de la session suivante en 1917.

« L'envahissement brutal de notre sol au mépris de tous les engagements, les ruines qui s'y sont accumulées au cours de la guerre, la détresse du pays tout entier ont eu comme conséquence forcée un ajournement prolongé de cette réunion » [1]. Dès la fin de la guerre, les géologues belges prennent l'initiative de relancer l'organisation du Congrès géologique international. Celui-ci se déroule en août 1922 à Bruxelles.

« *La guerre continue* ». Plutôt qu'un appel belliqueux, cette exclamation du géologue suisse Maurice Lugeon lors d'une des réceptions est un état des lieux de la situation, quatre ans après l'armistice. L'objectif de cette communication est de montrer comment la préparation du Congrès et son déroulement ont prolongé, au sein de la communauté géologique internationale, la guerre entre Alliés et Puissances centrales.

[1] Lettre circulaire aux corps scientifiques, Juillet 1921. Congrès géologique international, *Comptes rendus de la XIII<sup>e</sup> session, en Belgique 1922*. Liège, 1924, p.55.

**Mots-Clés:** Grande Guerre, après-guerre, Congrès géologique international, histoire, institutions géologiques, géologues, pays neutres

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: philippe.levigouroux@gmail.com

## Roughness description and characterisation of major fractures in Coniacian chalk at Wellington quarry (Arras, France)

Marie-Laure Wattier <sup>\*ψ1</sup>, Sara Vandycke <sup>1</sup>, Françoise Bergerat <sup>2</sup>, Fanny Descamps <sup>1</sup>,  
Jean-Pierre Tshibangu <sup>1</sup>

<sup>1</sup> University of Mons (UMONS) - Belgique

<sup>2</sup> Sorbonne Universités UPMC, Univ Paris06 - CNRS - France

A dozen meters below the city of Arras lies a vast network of about 20km of tunnels initially resulting from the intense production of chalk by room-and-pillar method since the XVIth century. The network was further developed into warrens in the First World War. The architecture of the widespread complex lying under the city clearly benefits from an intelligent use of the main tectonic structures present within the Upper Cretaceous Coniacian chalk rock mass.

The objective of our study was to establish a description of chalk fractures from the small-scale (sub-millimetric) up to the macroscopic scale, associating the analytical quantitative description of joints and faults in terms of roughness, together with qualitative observations of the geological features, within the related tectonic system.

In the southern-most parts of the Wellington quarry complex, the primary networks of sub-vertical joints and faults, orientated 105-125°N and 160-180°N, allowed for relatively easy rock removal during quarry production and provided planar pillar walls for a naturally stable structure. So, natural fractures can be directly observed and characterised along the galleries. Samples were hence collected at 12 different spots.

Once in the lab, small cylinders were cored from collected blocks. Series of cylinders were broken in half - by tensile (Brazilian) or shear method to be compared with natural fractures. On the natural surfaces, fault planes striations, ridges, twist hackles and plumose structures were observed. After visual classification, all samples were scanned with a high-precision laser to digitize the 109 fracture surface topographies (grid spacing of 172µm in X and Y directions and Z accuracy +/-30µm). Systematic computation of roughness indices was conducted using statistical parameters (average height and associated standard deviation Ra and oa, RMS parameter Z2) and fractal dimensions (semi-variogram, yardstick rule).

Z2 and yardstick fractal dimension Dyard provide the most consistent results in comparison to visual observations. Lab-generated fractures display distinctively higher roughness indices than natural fractures - with for example, Z2 varying from 1.22 to 0.41 and Dyard varying from 1.0104 to 1.0039. Within natural samples, no clear trend differentiate joints from fault fractures.

Lab-generated series of fractures present greater roughness for shear fractures with increasing confinement; the highest roughness values being seen on tensile fractures.

**Mots-Clés:** Arras, Chalk, Roughness, Fracture, Tectonic

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: marie-laure.wattier@umons.ac.be



# **11. PHYSIQUE DES ROCHEΣ : RHEOLOGIE ET CHANGEMENTS D'ECHELLES**

## Détermination du diagramme de phase du système Fe-P: Implications pour la solidification des noyaux planétaires

Julien Chantel <sup>\*1,2</sup>, Zhicheng Jing <sup>2</sup>, Man Xu <sup>3</sup>, Tony Yu <sup>4</sup>, Yanbin Wang <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Unité Matériaux et Transformations - UMR 8207 – Institut National de la Recherche Agronomique : UMR0638, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Lille, Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8207 – France

<sup>2</sup> Case Western Reserve University [Cleveland] – États-Unis

<sup>3</sup> Department of Earth, Environmental, and Planetary Sciences, Case Western Reserve University – Cleveland, OH 44106, États-Unis

<sup>4</sup> Center for Advanced Radiation Sources, The University of Chicago – Argonne, IL 60439, États-Unis

<sup>5</sup> Center for Advanced Radiation Sources, University of Chicago – États-Unis

Nous avons développé une nouvelle technique pour déterminer, à haute pression dans une presse multi-enclumes, les températures de l'eutectique (ou solidus) et du liquidus des alliages de fer avec un élément léger en étudiant la propagation d'ondes acoustiques à travers l'échantillon. Alors que le début de la fusion se manifeste par la perte des signaux d'ondes de compression (P) et de cisaillement (S) due à la dispersion des ondes acoustiques par la formation de liquide, la complétion de la fusion est confirmée par la réapparition des ondes P lorsque la diffusion due aux cristaux résiduels disparaît. En appliquant cette technique au système binaire Fe-P avec trois teneurs en phosphore différentes, nous avons pu contraindre la partie riche en Fe du diagramme de phase jusqu'à 7 GPa et 1733 K.

Nos résultats montrent que pour des compositions pauvres en phosphore, la température du liquidus présente une faible dépendance négative à la pression. Alors que pour les compositions riches en phosphore la température du liquidus augmente significativement avec la pression. Ceci indique un déplacement de la composition de l'eutectique vers des teneurs en phosphore plus faibles lorsque la pression augmente.

Par conséquent, les noyaux métalliques fondus de corps planétaires avec des teneurs faibles en phosphore, commenceront leur cristallisation par l'extérieur de leurs noyaux vers leurs centres. En revanche, les noyaux avec des compositions plus riches en phosphore connaîtront une cristallisation de bas en haut, ce qui conduira à la croissance d'un noyau interne solide.

**Mots-Clés:** géologie, planète, minéraux

<sup>\*</sup>Intervenant

## Vers une rhéologie effective de la transition lithosphère-asthénosphère : intégrer des données expérimentales de déformation de l'olivine à des modèles géodynamiques

Fanny Garel <sup>\*ψ1</sup>, Catherine Thoraval <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Montpellier – Institut national des sciences de l'Univers : UMR5243, Université de Montpellier; Centre National de la Recherche Scientifique :- France

La théorie de la tectonique des plaques a 50 ans ! Cependant, si les limites latérales des plaques sont plutôt bien définies par la répartition des séismes et des volcans à la surface de la Terre, la limite inférieure d'une plaque, c'est-à-dire la transition lithosphère-asthénosphère, reste encore mal comprise.

Cette transition, appelée LAB pour "Lithosphere-Asthenosphere Boundary", se produit dans les péridotites mantelliques et se produit donc sans discontinuité chimique ou minéralogique. Elle peut être étudiée d'un point de vue mécanique et rhéologique (cassant et rigide vs. ductile et peu résistant), sismologique (diminution de la vitesse des ondes sismiques à la LVZ ou anisotropie), et thermique (l'isotherme 1300 °C est souvent évoquée). Par ailleurs, les expériences de déformation de l'olivine, le principal minéral du manteau supérieur, ne semblent pas montrer de différence de mécanisme de déformation en fonction de la température : la déformation par fluage de dislocation semble toujours dominer à taux de déformation élevé sur le fluage par diffusion atomique. Nous présentons ici une paramétrisation des lois de fluage par dislocation en terme de viscosité effective, calculée à partir du rapport entre contrainte et taux de déformation. La viscosité effective associée au fluage par dislocation varie avec la température et le taux de déformation, dans une gamme de valeurs compatibles avec les contraintes sur la viscosité du manteau asthénosphérique (rebond post-glaciaire) et du manteau lithosphérique (rigidité des plaques tectoniques). Nous implémentons cette rhéologie effective dans des modèles numériques de subduction pour étudier plus en détail les conditions thermiques de la transition abrupte de viscosité dans le manteau (LAB) résultant d'un couplage rhéologie-dynamique.

**Mots-Clés:** rhéologie, olivine, manteau supérieur, lithosphère, asthénosphère, plaques tectoniques, viscosité, LAB

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: fanny.garel@gm.univ-montp2.fr

## Influence de la quantité de serpentine sur la rhéologie de serpentinites et la sismicité des zones de subduction : expériences de déformation sous haute pression

Nadège Hilairet <sup>\*ψ1</sup>, Thomas Ferrand, Alexandre Schubnel <sup>2</sup>, Sébastien Merkel <sup>1,3</sup>, Jérémie Guignard, Julien Gasc, Paul Raterron, Loïc Labrousse <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Unité Matériaux et Transformations (UMET) – Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8207, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Lille (ENSCL), Institut national de la recherche agronomique (INRA) – Université de Lille 59000 Lille, France

<sup>2</sup> Laboratoire de géologie de l'ENS (LGE) – INSU, CNRS : UMR8538, École normale supérieure [ENS] - Paris - 24 Rue Lhomond 75231 PARIS CEDEX 05, France

<sup>3</sup> Institut Universitaire de France (IUF) – Ministère chargé de l'enseignement supérieur et de la recherche - Boulevard Saint-Michel 75005 Paris, France

<sup>4</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTEPI) – Université Pierre et Marie Curie (UPMC) – Paris VI, CNRS : UMR7193, Université Pierre et Marie Curie [UPMC] - Paris VI - 4, place Jussieu BP CC129 75252 PARIS CEDEX 05, France

Les serpentinites sont des roches clés pour la compréhension de la dynamique des zones de subduction. A faible profondeur (15 km), quelques pourcent de taux de serpentinisation suffisent à abaisser la viscosité de la roche d'un ordre de grandeur. Elles sont ainsi supposées jouer un rôle de lubrifiant dans la subduction, et de faciliter l'exhumation des roches de haute pression telles que les éclogites. Cependant, la rhéologie des péridotites avec la variété de serpentine présente en profondeur, l'antigorite n'est pas quantifiée. L'influence de la déshydratation de l'antigorite, lors de la subduction, sur les propriétés mécaniques des serpentinites est également mal connue. Cependant cette déshydratation semble associée à une part de la sismicité observée dans les zones de subduction entre 50 et 250 km de profondeur, qui ne peut être expliquée par des théories conventionnelles sur la friction.

Nous présentons ici des expériences de déformation sous haute pression qui apportent des éléments de réponse à ces questions. Nous utilisons le couplage de presses hydrauliques pour la déformation contrôlée à haute pression et haute température, ici aux conditions du manteau terrestre et des zones de subduction. Les mécanismes de déformation, les limites et contraintes de fluage de roches polycristallines et polyminéraлиques peuvent être étudiées avec ces dispositifs. Les mesures des contraintes dans chaque phase minéralogique, et des orientations préférentielles cristallographiques (i.e. texture) ont été effectuées pendant la déformation (in-situ), en fonction du taux de déformation. Les développements les plus récents de ces expériences incluent des enregistrements d'émissions acoustiques. Ils nous ont permis d'étudier les instabilités mécaniques des serpentinites en déshydratation sous pression.

Les résultats qui seront présentés mettent en évidence un rôle crucial et non linéaire du taux de serpentinisation dans la rhéologie des serpentinites, et pour leur potentiel sismogène dans les zones de subduction.

**Mots-Clés:** serpentines, subduction, sismicité, déformation, expérimental

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: nadege.hilairet@univ-lille.fr



## Etude expérimentale des interfaces dans le manteau profond

Sébastien Merkel <sup>\*1,2</sup>, Estelle Ledoux <sup>1</sup>, Christopher Langrand <sup>1</sup>, Angelika Rosa <sup>3</sup>, Julien Chantel <sup>1</sup>, Nadège Hilairet <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unité Matériaux et Transformations (UMET) – Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8207, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Lille (ENSCL), Institut national de la recherche agronomique (INRA) – Université de Lille 59000 Lille, France

<sup>2</sup> Institut Universitaire de France (IUF) – Ministère chargé de l'enseignement supérieur et de la recherche – Boulevard Saint-Michel 75005 Paris, France

<sup>3</sup> European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) – ESRF – 6 rue Jules Horowitz BP220 38043 GRENOBLE CEDEX, France

Les transformations minérales induisent des discontinuités importantes dans le manteau terrestre. Ces régions sont une source significative d'information sur la dynamique et les propriétés du manteau profond car elles affectent la propagation des ondes sismiques, l'une des rares observables directes pour ces régions.

En particulier, les transformations de phase affectent la microstructure: arrangement des phases minérales, tailles de grain, orientations de grains, etc. La microstructure, ensuite, affecte la forme des signaux sismiques. Dans nos travaux, nous cherchons à reproduire les conditions présentes dans le manteau profond et mesurer les microstructures induites par les transformations minéralogiques. Nous évaluons, ensuite, les effets de ces transformations sur la forme des signaux sismiques avec, pour objectif, de pouvoir obtenir des informations sur la dynamique de ces régions.

Ce poster présentera différents aspects de ce travail, les méthodes expérimentales utilisées, ainsi que des exemples de mise en application sur des transformations présentes dans le manteau terrestre.

**Mots-Clés:** Manteau terrestre, minéralogie, expérimentation, dynamique

Intervenant



## Geophysical pore type inversion in carbonate reservoirs and implications for the depositional and diagenetic architecture (Upper Burman Limestone, Lower Miocene, Yadana field, offshore Myanmar)

Thomas Teillet <sup>\**ψ*</sup><sup>1,2</sup>, François Fournier <sup>2</sup>, Luanxiao Zhao <sup>3</sup>, Quentin Villeneuve <sup>1,2</sup>, Fei Hong <sup>1</sup>

<sup>1</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) - TOTAL - Centre Scientifique et Technique Jean Féger.  
Avenue Larribau 64018 Pau Cedex, France

<sup>2</sup> UM 34 CEREGE CNRS (UMR 7630) - IRD (UMR 161) - Aix-Marseille Université - AMU, CNRS : - France

<sup>3</sup> School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai - China - Chine

The detection of pore architectures from seismic data is a major challenge for hydrocarbon exploration in carbonate settings. The acoustic properties of carbonate reservoirs are largely controlled by pore space architecture that is structured by depositional processes and by subsequent diagenetic modification of the sediment. In clean, mono-mineralic (calcitic) carbonate reservoirs, elastic properties are largely controlled by porosity and pore network architecture. The purpose of this work is to quantify the porosity and the pore type effect on elastic properties firstly from the well-log data and secondly from the seismic data using a geological/geophysical integrated workflow coupling (1) the quantitative pore type description on thin section, SEM and cores, (2) the well-logs inputs data (bulk-density, porosity, P- and S- wave velocities) and the differential effective medium theory models. This method named the geophysical pore type (GPT) inversion is applied from the seismic data in the Yadana carbonate reservoir, off-shore Myanmar. Calibrated to the well-logs-derived GPT inversion (1D), the major issue of the present workflow is the 2D and 3D inversion of the spatial distribution of the geophysical pore types at the seismic scale. The spatial distribution of the geophysical pore type provides relevant elements regarding the stratigraphic and diagenetic architecture of the carbonate reservoir. As a consequence, coupled to detailed sedimentological study, the analysis of the GPT inversion results provides new insights into the depositional and diagenetic processes of carbonate systems.

**Mots-Clés:** Carbonates, Diagenesis, Pore Type, Geophysics, Seismic inversion

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: teillet@cerege.fr

## Innovative carbonate prediction by using well-log sonic, NMR, Borehole images and DEM approaches: Cretaceous lacustrine carbonate case study (Offshore Brazil)

Quentin Villeneuve <sup>\*1,2</sup>, François Fournier <sup>2</sup>, Thomas Teillet <sup>1,2</sup>, Jean Borgomano <sup>3</sup>, Fei Hong <sup>1</sup>

<sup>1</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) - TOTAL - France

<sup>2</sup> UM 34 CEREGE CNRS (UMR 7630) - IRD (UMR 161) - Aix-Marseille Université - AMU, CNRS : UMR7630 - France

<sup>3</sup> Centre européen de recherche et d'enseignement de géosciences de l'environnement (CEREGE) - Aix-Marseille Université - AMU - France

Pre-salt Aptian lacustrine carbonates have known an increasing interest since large oil discoveries have been proven offshore Brazil during the last decades. Carbonate prediction from well-logs and seismic data represents a major challenge for both exploration and reservoir studies in such systems. Differential effective medium (DEM) theories are used to model elastic properties ( $V_p$ ,  $V_s$ ) of virtual porous rock with various pore shapes. The EPAR (Equivalent Pore Aspect Ratio) is a DEM-derived parameter that is defined as the aspect ratio of spheroidal pores that are acoustically equivalent with the actual pore system. This parameter provides insights into dominant pore type morphology and microstructure at well log scale. The NMR (nuclear magnetic resonance) tool is another way to appreciate pore type by recording the relaxation time ( $T_2$ ) of hydrogen after a magnetic perturbation. This time response is used as a proxy of pore size calibrated by image analysis. The borehole imaging (BHI) tool has been used to identify the main texture and structures (granular, laminated, large pore, breakout). The integration of EPAR and NMR and BHI approaches has been used for predicting geological facies at log scale. Predicted facies have been calibrated within 20m cored intervals by using petrographic description of cores and thin sections and Side Wall Cores (SWC) located along the well.

This approach helps to identify 5 facies within the Barra Velha Formation: (i) Low microporous bindstone. (ii) Porous bindstone. (iii) Peloidal bioclastic packstone. (iv) Large interparticle or moldic macroporosity in spherulitic grainstones. (v) Conglomerate with enlarged interparticle pores.

**Mots-Clés:** Lacustrine carbonate, Carbonate prediction, pore type

\*Intervenant



# **12. HYDROGEOLOGIE // INTERACTION EAUX SOUTERRAINES ET ECOSYSTEMES**

## Evaluation de l'impact des aménagements hydrauliques sur les champs captants AEP à partir d'une nouvelle approche d'estimation des échanges nappe / rivière – Cas de la Basse Durance – Secteur Avignon

Leïla Courtot <sup>\*ψ1</sup>, Séverin Pistre <sup>1</sup>, Pascal Fenart <sup>2</sup>, Bertrand Jacopin <sup>3</sup>, Salah Nofal <sup>4</sup>, Eric Duverger <sup>3</sup>, Fabienne Mercier <sup>3</sup>, Vanessa Escande <sup>3</sup>, Laure Moreau <sup>3</sup>, Philippe Picon <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Hydrosciences-Montpellier, Univ Montpellier, France (HSM) – Université Montpellier – France

<sup>2</sup> Hydrofis - 15 rue Alexis Mossa 06000 NICE, France

<sup>3</sup> Syndicat Mixte d'Aménagement de la Vallée de la Durance (SMAVD) – SMAVD – France

<sup>4</sup> Laboratoire Génie Civil et Géo-Environnement [Villeneuve d'Ascq] (LGCgE) – Université de Lille – 59655 Villeneuve d'Ascq, France

Depuis la nouvelle DCE, de nombreux efforts ont été menés au cours des 20 dernières années afin de reconquérir la qualité des cours d'eau. Cependant, les ouvrages hydrauliques tels que les seuils peuvent entraver la continuité piscicole et donc être défavorables pour la restauration écologique. Pour garantir la pérennité piscicole, l'abaissement ou la suppression des seuils sont donc envisagés. Ce redimensionnement peut avoir pour conséquence une baisse des niveaux piézométriques. Il est donc nécessaire de réaliser au préalable, des études d'impact de ces travaux, sur la nappe alluviale, souvent exploitée pour l'Adduction en Eau Potable.

Les modèles usuels représentent les échanges nappe / rivière de façon trop sommaire pour estimer avec la précision nécessaire, l'impact des modifications des lignes d'eau et/ou du lit des rivières sur les captages. Ainsi, une nouvelle approche de détermination du coefficient d'échange est proposée. Considérant des coefficients d'échange variables dans le temps et dans l'espace, cette approche permet de prendre en compte les fluctuations de la ligne d'eau et ainsi les surfaces de substrat immergées en fonction des débits.

Cette démarche a notamment été appliquée sur la Vallée de la Basse Durance, à l'aval du barrage de Mallemort depuis Bonpas jusqu'à la confluence avec le Rhône. Sur cette portion du cours d'eau, il existe trois seuils totalisant une hauteur de chute d'environ 10 mètres. En 2016, l'un d'entre eux, nommé le seuil 68, a été vidangé dans le cadre d'une étude hydrodynamique. Cette expérimentation en grandeur réelle a permis l'acquisition synchrone de mesures piézométriques et de hauteurs d'eaux dans la rivière. La calibration du modèle a pu être faite sur cette rare expérimentation, alors que la validation a été menée sur l'ensemble des piézomètres présents sur la plaine alluviale sur deux cycles hydrologiques.

L'obtention d'un modèle numérique robuste reproduisant à 30 cm près la piézométrie réelle, servira d'outil de décision et de gestion quant aux scénarios d'abaissement des seuils et peut aussi prévoir les impacts sur la nappe en cas d'augmentation des capacités de production pour l'Alimentation en Eau Potable des champs captants.

**Mots-Clés:** Echanges nappe/rivière, coefficient de colmatage, nappe alluviale, champs captants

Intervenant

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: courtot.leila@gmail.com

## Etude hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère du crétacé inférieur de la région d'El Hendjir. Atlas Saharien Occidental, Algérie

Abdessamed Derdour <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre universitaire Salehi Ahmed de Naama. - Algérie

Faisant partie du cœur de l'Atlas saharien occidental situé au sud-ouest Algérien, la région d'El Hendjir constitue une très belle approche pour comprendre les phénomènes hydrogéologiques qui régissent les écoulements souterrains, leurs origines ainsi que leurs chimismes liés principalement à la zonalité géologique de la région.

En plus de l'alimentation en eau potable, l'agriculture représente la première activité socio-économique de la région et la plus consommatrice des ressources hydriques. De nombreux puits et forages ont été créés, et le nombre n'a cessé d'augmenter d'une année à l'autre avec une demande croissante pour la création de forages de moyenne profondeur.

Face à cette situation, avec une probable surexploitation et pollution des nappes, notamment par les engrains chimiques, une étude hydrogéologique et hydrochimique de système aquifère de la région s'impose.

L'objectif de l'étude vise, en plus de la connaissance du fonctionnement et des potentialités de ces aquifères, la gestion et la protection de cette ressource, qui nécessite une étude détaillée des différents éléments du bilan et des processus hydrogéologiques, leur distribution spatiale et temporelle, leur qualité physico-chimiques, ainsi que toutes les actions anthropiques qui peuvent avoir une influence qualitative et quantitative.

Les résultats de la campagne piézométrique indiquent un sens d'écoulement NW-SE des eaux de la nappe Barrémo Albo Aptienne, ce qui montre que l'exutoire de la nappe est la source Skhouna, et que l'alimentation de la nappe se fait par l'infiltration des eaux de pluies à partir des massifs de Djebel Hairech et Bahria. Et par la comparaison de cette campagne avec celle de 2006, nous remarquons que le niveau statique a baissé plus de 7m. Cette baisse est causée par la surexploitation et l'épuisement de la nappe par les nombreux puits

Les résultats des analyses physico chimiques témoignent la bonne qualité des eaux de " la formation de Tiout ", qui se servent à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation des terres cultivables.

**Mots-Clés:** Atlas saharien, Hendjir, aquifères, surexploitation, campagne piézométrique

\*Intervenant

## Docteur, mon forage ne va pas bien

Bernard Droz <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sade forages d'eau Service Etudes et Diagnostics - Sade - France

Trop souvent, on a voulu rechercher les causes d'un problème d'exploitation des eaux souterraines, qu'il soit sur le plan qualitatif ou quantitatif, en posant un regard sur l'environnement ou sur une faiblesse de l'aquifère concerné.

On a alors oublié que le forage d'eau pouvait très souvent être à lui seul la cause des inconvénients observés, soit en raison d'un mauvais état interne, soit en raison d'une mauvaise exploitation de l'ouvrage.

C'est pourquoi des diagnostics des forages d'eau sont plus que nécessaires, non seulement pour se conformer à la loi, qui prévoit un contrôle de leur état interne par caméra tous les 10 ans, mais aussi en réalisant des investigations avec des tests de pompage pour vérifier si une dérive de productivité ou de qualité se produit.

Des modifications du régime d'exploitation ont pu être proposées pour soulager le couple " nappe - forage " et pérenniser la production d'eau, car un forage d'eau n'est pas seulement un robinet qui coule, et quand le robinet ne coule plus, la réaction est souvent trop tardive.

La notion d'entretien préventif devient alors prédominante par rapport à la notion d'entretien curatif, qui passe nécessairement par des ruptures d'exploitation.

L'exposé présentera la démarche d'un diagnostic à l'aide de nombreux exemples, notamment au niveau des inspections par caméra, qui doivent amener à faire réfléchir tout exploitant à l'intérêt de bien connaître son ouvrage d'exploitation.

**Mots-Clés:** Forages, diagnostic, entretien préventif

\*Intervenant

## Le contexte géologique corse, une diversité unique de gisements d'eaux souterraines thermo-minérales

Margaux Dupuy <sup>\*ψ1</sup>, Frederic Huneau <sup>1</sup>, Emilie Garel <sup>1</sup>, Sébastien Santoni <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Corse (Laboratoire d'Hydrogéologie) - CNRS : UMR6134 - France

Avec plus d'une quarantaine de sources thermo-minérales répertoriées sur l'ensemble de son territoire, la Corse est l'une des régions présentant le plus grand nombre de gisements d'eaux souterraines thermo-minérales de France. Ces émergences sont encore peu sollicitées malgré un regain d'intérêt régional pour une revalorisation de ce patrimoine. En dépit de cela, aucune étude contextuelle du fonctionnement hydrodynamique et géochimique de ces gisements n'a, à l'heure actuelle, été réalisée.

Les sources thermo-minérales se situent à l'interface entre la Corse hercynienne granitique, la Corse alpine essentiellement composée des schistes lustrés et d'ophiolites et la plaine orientale composée exclusivement d'une série sédimentaire du miocène. L'ensemble de ces émergences présentent dans des proportions relatives, des fractions gazeuses, sulfurées et ferrugineuses, qui leur confèrent des caractéristiques physico-chimiques singulières.

Dans le but de lever le verrou scientifique associé au fonctionnement qualitatif et quantitatif de ces résurgences, une caractérisation géochimique et isotopique mensuelle incluant paramètres physico-chimiques, éléments majeurs, isotopes stables de la molécule d'eau, soufre-34 et ratio  $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ , a été entreprise sur 22 émergences.

Les premiers résultats montrent une diversité de facies inédite, de type  $\text{SO}_4^{2-}\text{-Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^{-}\text{-Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^{-}\text{-Na}^{+}$ ,  $\text{HCO}_3^{-}\text{-Na}^{+}$ . Les isotopes stables de la molécule d'eau mettent en évidence deux zones de recharge distinctes, l'une de basse altitude (0-100 m) et l'autre de haute altitude (> 850 m). De plus, deux sources ont été datées par le carbone 14, l'une émergeant en contexte sédimentaire et l'autre en contexte granitique. Les temps de séjours mis en évidence sont respectivement de l'ordre de 4000 et 8000 ans, traduisant un temps de parcours très long.

Une telle diversité de facies associée à des très longs temps de séjours montre l'importance du contexte géologique et de l'identification des interactions eau-roche le long des lignes d'écoulements, dans la compréhension du fonctionnement hydrodynamique et géochimique de ces gisements.

Cette combinaison d'outils géochimiques et isotropiques complémentaires s'est révélée pertinente dans la caractérisation des processus hydrogéologiques spécifiques aux gisements thermo-minéraux corses. Cela pourra être par la suite applicable à n'importe quel autre gisement thermo-minéral complexe présentant une forte typicité.

**Mots-Clés:** Gisements thermominéraux, Hydrogéologie, Géochimie isotopique

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: margauxdupuy@yahoo.fr

## Geochemical and isotopic data combined with organic pollutant concentrations to understand the behaviour of a Mediterranean groundwater dependent ecosystem

Mélanie Erostate <sup>\*1</sup>, Frédéric Huneau <sup>1</sup>, Emilie Garel <sup>1</sup>, Sébastien Santoni <sup>1</sup>, Vanina Pasqualini<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Corse, CNRS UMR 6134 SPE, Laboratoire d'Hydrogéologie, BP 52, F-20250 Corte, France – Université de Corse, CNRS : UMR6134 SPE – France

Coastal aquifers ensure a fundamental role for drinking water supplies and irrigated agriculture around the world. Yet, these resources are highly vulnerable and subject to quality and quantity degradation. In addition to being essential for socio-economic activities, groundwater also plays an important role in coastal wetlands conservation by maintaining a large part of the fresh water supplies to these very sensitive ecosystems. Therefore, appropriate management of water is required to combine sustainable exploitation and ecological preservation of hydraulically connected surface waters and associated ecosystem services. To this end, understanding the functioning and the recharge processes of coastal aquifers is crucial. Geochemical and isotopic data are commonly used to constrain groundwater behaviour, our study proposes a less common approach, combining geochemical/isotopic data with emerging organics pollutants. The occurrence of organic contaminants is already highlighted in many hydrosystems worldwide. So, understanding the source and the fate of these pollutants can help constrain the aquifer dynamics and thus ensure the preservation of groundwater dependant ecosystems.

We used this combined approach on the Marana-Casinca alluvial plain (Corsica, France). This shallow coastal aquifer brings a large part of the freshwater inputs to the Biguglia lagoon, but it is also strongly exploited and impacted by local anthropogenic activities. Three sampling campaigns were carried out in April and September 2015 and in May 2016 for the groundwater characterization (physico-chemical parameters, major elements,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{2\text{H}}$ ,  $^{3\text{H}}$ ) and the analyses of 51 organic pollutants in ground, surface, lagoon and untreated waste water.

The geochemical and isotopic data allows the characterization of groundwater recharge processes. Most of the aquifer is recharged by river water infiltration, especially in the Southern part (up to 90%). In the Northern part, the mountainous schist formations also contribute significantly to the aquifer recharge (from 10% to 75%). The detection of 6 organic pollutants in groundwater demonstrate a stronger anthropogenic influence in the South, due to the considerable urbanization of the area. These particularly non conservative and quickly degraded organic pollutants suggest a fast transfer time of surface water towards groundwater (under 18 months) and allow the improvement of the conceptual model of this complex aquifer.

**Mots-Clés:** Coastal aquifer, Groundwater dependent ecosystem, Emerging organic pollutants, Environmental isotope, Geochemistry

<sup>\*</sup>Intervenant

## Cartographie et gestion des zones à risque d'inondation dans les plaines alluviales: cas de Fombap (plaine des Mbo, ouest-Cameroun)

Djukem Fenguia Sylvie Noelle <sup>\*ψ1</sup>, Nkouathio David Guimolaire <sup>1</sup>, Bardintzeff Jacques-Marie <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculté des Sciences - Université de Dschang – Cameroun

<sup>2</sup> Université Paris-Sud, UMR CNRS 8148 GEOPS, Bât. 504, F-91405, Orsay, France – Université de Cergy Pontoise – France

Une analyse des facteurs du milieu responsables des inondations dans la localité de Fombap (plaine des Mbo, ouest-Cameroun) a démontré que les conditions naturelles de ce milieu couplées à l'activité anthropique sont très favorables au processus d'inondation. En effet, sur le plan géo-morphologique, la localité de Fombap est constituée en majorité par des terrains plats avec des pentes qui varient de faible à localement abrupt. Sur le plan géotechnique, la texture des sols est dominée par les sables (40,4%) et les argiles (33,4%). Ainsi, les sols sableux favorisent une remontée rapide de la nappe phréatique tandis que les sols très argileux induisent une imperméabilisation de ces derniers (entre 10-6 et 10-7m/s). Sur le plan hydrologique, les précipitations sont importantes (2413mm/an) et tombent abondamment sur de très longues périodes. Le réseau hydrographique de type dendritique, favorise l'écoulement de l'eau des montagnes vers la plaine. La nappe phréatique est très proche de la surface (1 à 4m) et se charge très rapidement à la suite des premières pluies ; ce qui empêche les eaux de continuer leur infiltration. Par conséquent, celles-ci stagnent à la surface du sol engendrant les inondations. Enfin, les pressions anthropiques sans cesse croissantes sur le milieu amplifient les conséquences des inondations sur les populations. La télédétection et les SIG ont été mis à contribution pour la cartographie des zones à risque d'inondation dans le site d'étude. Il en découle que 69,5% de la superficie totale de la localité de Fombap sont soumis à un risque important d'inondation. Les solutions efficaces envisageables pour la prévention des risques dans la zone concernent l'approfondissement du lit des cours d'eau et des rivières particulièrement le cours d'eau Menoua, la création des bassins de rétention en eau et la surélévation du niveau des maisons par rapport à la hauteur des crues.

**Mots-Clés:** risque d'inondation, plaine alluviale, SIG, cartographie des risques, Fombap, Mbo, Cameroun

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: djukemsylvie9@gmail.com

## Analyse des facteurs physiques et du bilan pluviométrique qui conditionnent les écoulements des bassins versants du Nord-est de l'Algérie

Yassine Ferrah <sup>\*1</sup>, Mani Hannouche <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de recherche géologique (LRG) (LRG) - Université Badji Mokhtar, BP12, Annaba Algérie

Le bassin de l'oued Seybouse se trouve à l'extrême Nord-est Algérien et alimente la plaine d'Annaba qui se présente sous forme de deux nappes superposées.

La première composée de formations sablo-argileuses, la seconde formée de dépôts graveleux et d'une matrice sablo-argileuse. Plus nous allons vers le Nord et plus ces nappes se trouvent séparées par une couche argileuse isolant les deux nappes avec une perméabilité verticale de 10-9 à 10-8m/s. Le contact entre les deux nappes se fait par effet de drainance. L'écoulement général prend une direction sud-nord avec un gradient (6.10-4) en amont, et (4.10-4) en aval. Le coefficient de perméabilité de l'ensemble étant de 10-4m/s, le régime d'écoulement est influencé par les caractéristiques physiques des bassins versants et par la morphologie de la Seybouse auxquels se greffent la nature lithologique et le couvert végétal. Le travail porte sur l'état qualitatif et quantitatif des ressources en eaux souterraines.

Les capacités d'emmagasinement étant faibles, une partie se déverse dans des oueds servant de dépotoir pour les rejets domestiques et urbains. L'objectif de cette étude est l'analyse de l'interaction entre la morphologie, la lithologie et la dynamique actuelle des échanges nappes - oued à l'échelle d'un bassin versant.

**Mots-Clés:** Drainance, perméabilité, gradient, interaction.

<sup>\*</sup>Intervenant

## Impact de 150 années d'activités militaires continues sur la qualité des eaux

Jessy Jaunat <sup>\*1</sup>, Benjamin Cancès <sup>1</sup>, Arthur Thoraval <sup>1</sup>, Pascale Bauda <sup>2</sup>, Béatrice Marin <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Groupe d'Étude sur les Géomatériaux et Environnements Naturels, Anthropiques et Archéologiques - EA 3795 (GEGENAA) – Université de Reims Champagne-Ardenne : EA3795 – France

<sup>2</sup> Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux (LIEC) – Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7360 – France

La prise de conscience de l'impact environnemental des activités militaires est récente. Cette thématique se développe depuis la fin des années 90 aux Etats-Unis et elle encore rarement étudiée en Europe. Le Pays de Bitche (Moselle) a été l'objet d'intenses bombardements depuis le 19ème siècle (Guerre Franco-Prussienne, Première et Deuxième Guerres Mondiales) et le camp militaire de Bitche est utilisé pour des manœuvres d'entraînements entre les conflits. L'activité y est donc continue depuis 150 ans et y est encore très active aujourd'hui. Ce camp militaire est situé à l'aplomb d'une zone de recharge préférentielle de l'aquifère des Grès du Trias Inférieur, ressource stratégique pour l'alimentation en eau potable à l'échelle locale et inter-régionale. Il apparaît donc indispensable d'évaluer l'existence d'une contamination des eaux du secteur par les activités passées et actuelles.

Au printemps 2017, 18 points de prélèvement d'eaux souterraines et superficielles ont été sélectionnés à l'intérieur et autour du camp militaire. Huit forages, trois sources, six cours d'eau et un étang ont été échantillonnés pour l'analyse de 35 molécules d'origine pyrotechnique (perchlorates et composés nitro-aromatiques tels que TNT, DNT, etc) susceptibles d'être retrouvées dans ce contexte. Les perchlorates ( $\text{ClO}_4^-$ ) sont des oxyanions très solubles et persistants dans l'environnement contrairement à la majorité des 34 composés organiques analysés. Ces derniers peuvent donc être assimilés à des marqueurs d'une diffusion récente, alors que les perchlorates sont susceptibles de persister plusieurs décennies dans l'environnement.

Les échantillons prélevés dans cinq forages et quatre eaux superficielles ont montré un marquage géochimique par les activités militaires. Les concentrations mesurées sont globalement faibles et presque toujours inférieures aux seuils de potabilité, quand ils existent. Les eaux souterraines semblent plutôt influencées par des activités militaires anciennes (présence de perchlorates uniquement) alors que les eaux de surfaces à l'intérieur du camp sont clairement marquées par une diffusion actuelle (présence de composés organiques). Les différents conflits militaires et les activités menées sur le camp ont donc laissé une trace durable sur la qualité de l'eau du secteur. Néanmoins, l'atténuation de ces impacts est parfaitement assurée, notamment par des processus de dilution et de biodégradation qu'il conviendra d'étudier.

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du Labex DRIIHM, programme "Investissements d'avenir" portant la référence ANR-11-LABX- 0010, et d'une aide de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse.

**Mots-Clés:** Activités militaires, Molécules pyrotechniques, Perchlorates, Aquifère des Grès du Trias Inférieur

<sup>\*</sup>Intervenant

## Influence des eaux profondes salée sur la minéralisation des aquifères karstiques superficielles (Corbières Orientales)

Somar Khaska <sup>\*1</sup>, Corinne Le Gal La Salle <sup>\*1/1</sup>

<sup>1</sup> Université de Nîmes-CHROME – KHASKA – France

Dans le contexte du réchauffement climatique global et de la réduction progressive des ressources en eau dans le bassin méditerranéen, le choix de cette étude s'est porté sur une des plus importante source du sud de la France, la source de l'Oeillal (Aude) dont le débit peut atteindre 1600 m<sup>3</sup>/h. L'étude s'est faite de 2009 à 2011. L'objectif était de caractériser l'eau de cette source et de tracer l'origine de sa salinité à l'aide d'une approche multi-traceurs couplant ions majeurs, certains ions en traces (Sr<sup>2+</sup>, Li<sup>+</sup>, Rb<sup>+</sup>, Cs<sup>+</sup>, B<sup>3+</sup> et Br<sup>-</sup>) et isotopes (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr, d<sup>18</sup>O, d<sup>2</sup>H, <sup>36</sup>Cl/<sup>35</sup>Cl, <sup>37</sup>Cl).

Les différents traceurs rapportés aux teneurs en Cl<sup>-</sup> (diagrammes binaires des teneurs en éléments majeurs, rapports Br/Cl, d<sup>37</sup>Cl et rapport <sup>36</sup>Cl/Cl) ainsi que le diagramme de mélange du Sr suggèrent que la source de l'Oeillal correspond à des venues profondes d'eaux ayant été au contact d'évaporites triasiques salifères et remontant vers la surface à la faveur de l'accident majeur oligocène. L'hypothèse de ces venues profondes est confortée par les fortes concentrations en Cl, Na, Li, Cs, B et Rb, ainsi que les faibles rapports Br/Cl de l'eau de l'Oeillal qui soulignent l'influence à la fois de la dissolution de halite appauvrie en Br et d'évaporites du stade terminal (> 90%) du cycle d'évaporation (enrichissement en Li, Rb, Cs et B). Les rapports <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr de l'eau de l'Oeillal sont nettement plus radiogéniques ( $0.708817 \leq 87\text{Sr}/86\text{Sr} \leq 0.709022$ ) que ceux des eaux karstiques locales ( $0.708396 \leq 87\text{Sr}/86\text{Sr} \leq 0.708698$ ). Le caractère radiogénique du Sr de l'eau de l'Oeillal est attribué au contact des eaux profondes avec le complexe argileux gypsifère et salifère du Keuper riche, entre autres, en Rb et donc en <sup>87</sup>Sr radiogénique et constituant le niveau de décollement de la nappe des calcaires.

Aux erreurs expérimentales près, les données d<sup>18</sup>O et d<sup>2</sup>H de l'eau de l'Oeillal et des eaux karstiques sont similaires et correspondent à des eaux météoriques récentes et locales. Les rapports <sup>36</sup>Cl/Cl de l'eau de la source de l'Oeillal sont élevés (19.9-27.9 10-15 at/at). Dans le diagramme <sup>36</sup>Cl/Cl vs Cl les données sur l'eau de l'Oeillal et les eaux karstiques s'alignent sur une droite de mélange passant par la composition de la halite et correspondant à une recharge pendant la période du pic des essais thermonucléaires (1952-1964), avec des précipitations présentant un rapport <sup>36</sup>Cl/Cl 20 fois supérieur à celui des précipitations actuelles.

**Mots-Clés:** Hydro, Géochimie, Eaux profondes, Trias salifères, thermalisme, isotopes

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>1/1</sup>Auteur correspondant: corinne.legallasalle@unimes.fr

## Impact d'une érosion polyphasée sur l'architecture des corps sédimentaires et les interactions hydrogéologiques : exemple de l'anticlinal de Villagrains-Landiras (Gironde, France)

Cloé Labat <sup>\*ψ1</sup>, François Larroque <sup>1</sup>, Raphaël Bourillot <sup>1</sup>, Bruno De Grissac <sup>2</sup>, Alain Dupuy <sup>1</sup>,  
Pierre Bourbon <sup>3</sup>, Jean-Pierre Platel <sup>4</sup>, Marc Saltel <sup>3</sup>

<sup>1</sup> EA 4592 Géoressources et Environnement - Université Bordeaux Montaigne, Bordeaux INP, ENSEGID, - France

<sup>2</sup> Syndicat mixte d'étude et gestion de la ressource en eau du département de la Gironde - SMEGREG - France

<sup>3</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) - Nouvelle-Aquitaine - France

<sup>4</sup> Consultant - Géosciences - France

Le Bassin Aquitain a été structuré par plusieurs phases successives d'extension à partir du Trias, puis par des phases de compression depuis le Crétacé supérieur jusqu'au Tertiaire. Cette géodynamique est à l'origine de la formation des ridges anticlinales d'orientation N110 présentes sur toute la plateforme aquitaine. L'anticlinal de Villagrains-Landiras, situé au sud de Bordeaux, est le témoin de ces événements tectoniques. Cette structure haute a subi au Tertiaire une succession de phases d'émergence/érosion, conséquences de la compression pyrénéenne et des fluctuations du niveau marin. Ces épisodes sont à l'origine de variations de faciès de part et d'autre de l'axe de l'anticlinal et de la formation de biseaux sédimentaires dont les géométries et l'extension étaient jusqu'à présent très mal caractérisées. L'aquifère du Cénomanien, sub-affleurant dans la partie occidentale de l'axe de l'anticlinal, est ciblé dans le cadre d'une recherche de ressources de substitution aux aquifères tertiaires exploités pour l'alimentation en eau potable. Quinze sondages de reconnaissance géologique, carottés et destructifs, ont été réalisés dans le cadre de cette étude. Ils offrent une meilleure compréhension de la géologie aux abords de la structure anticlinale et sont essentiels à une compréhension globale des interactions hydrauliques locales, notamment grâce à la caractérisation des niveaux réservoirs et épontes et de la précision des extensions des dépôts. Cette nouvelle vision de la structure anticlinale de Villagrains-Landiras permettra d'affiner le modèle géologique de la zone et de mieux appréhender les interrelations des différents hydrossystèmes afin d'apporter des éléments de réponse quant à l'exploitabilité de l'aquifère du Cénomanien.

**Mots-Clés:** Anticlinal, Bassin Aquitain, interactions hydrauliques, Cénomanien, Gironde

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: cloe.labat@smegreg.org

## Interactions nappe/rivière lors d'opérations de rabattement de nappe pour la pose d'un gazoduc : atténuation des impacts sur la faune piscicole par la réinfiltration en nappe des eaux pompées

Florence Lenhardt <sup>\*1</sup>, Coralie Dode <sup>1</sup>, Marc Boisson <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Artelia Eau Environnement [Echirolles] – ARTELIA – France

GRTgaz a mis en place en 2017-2018 un gazoduc de 190 km de long et de 1,20 m de diamètre entre Etrez (01) et Voisines (52). Dans la région de Dijon, la pose du gazoduc a nécessité d'importantes opérations de rabattement de nappe dans la plaine alluviale. Les eaux pompées ont été rejetées dans les fossés et cours d'eau à proximité du chantier.

Dans la zone de projet, les enjeux environnementaux sensibles à ces opérations de pompage/rejet sont les cours d'eau (potentiellement création d'assec et dégradation de la qualité de l'eau par les rejets) et les étangs de pêche abritant des espèces piscicoles sensibles (possible baisse de niveau d'eau, risque d'anoxie).

Cette vulnérabilité a été fortement accentuée par les conditions de sécheresse rencontrées, avec une situation déjà critique de certains cours d'eau avant le démarrage des pompages.

Le fait d'exécuter les travaux sur un seul exercice agricole a par ailleurs imposé une cadence de pose soutenue, avec des linéaires de pompage simultané de plusieurs centaines de mètres, générant des cônes de rabattement piézométrique étendus.

Dans ce contexte, un monitoring a été mis en place permettant de suivre en continu l'influence du chantier sur les niveaux de la nappe, des cours d'eau et des gravières utilisées pour la pêche sportive.

Lors du démarrage des pompages à proximité de la source de la Biétre, un assèchement de la partie amont du cours d'eau a été rapidement observé. Des mesures d'urgence ont été mises en œuvre pour préserver la faune aquatique : réalimentation artificielle de la Biétre par des citerne d'eau et déplacement vers l'aval des poissons piégés dans des poches d'eau isolées.

Parallèlement, l'analyse de l'évolution des niveaux de nappe sur les points de suivi a permis d'optimiser les pompages. De plus, des tranchées de réinfiltration ont été mises en œuvre afin de restituer les eaux pompées à la nappe dans un périmètre proche du chantier, limitant ainsi de façon efficace et pérenne les impacts des pompages au-delà de ces tranchées.

Si les mesures mises en œuvre se sont avérées in fine efficaces, il s'avère toutefois intéressant de savoir si un modèle basé sur les données disponibles en phase études aurait permis d'évaluer correctement ces impacts. Un modèle hydrogéologique a alors été développé a posteriori.

L'objectif in fine est de proposer des améliorations de la méthodologie des études d'incidence de ce type de chantier afin de prévoir des mesures de mitigation adaptées.

**Mots-Clés:** rabattement de nappe, impact environnemental, échanges nappe/rivière, écosystème aquatique, modélisation hydrogéologique

## Dynamique naturelle des transferts d'eau et de matière dans un réservoir carbonaté en zone saturée et non saturée par couplage géophysique et géochimique : application au stockage géologique de CO<sub>2</sub>

Anélia Petit <sup>\*1</sup>, Adrian Cerepi <sup>1</sup>, Corinne Loisy <sup>1</sup>, Olivier Le Roux <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut Polytechnique de Bordeaux – Bordeaux INP, G – France

Les travaux présentés visent à comprendre, quantifier et modéliser l'impact environnemental des fuites de CO<sub>2</sub> lors d'un stockage géologique sur la qualité de l'eau dans la zone non saturée (ZNS) et dans la nappe, lors des interactions CO<sub>2</sub>-eau-roche dans un système réservoir carbonaté. Auparavant, il est impératif d'étudier la dynamique naturelle des transferts d'eau et de matière de l'hydrosystème où des fuites peuvent se produire. De facto, le couplage des méthodes géophysiques et géochimiques permet de spatialiser et de quantifier ces processus. Ces recherches sont menées sur un site pilote expérimental localisé à Saint-Emilion (Gironde), dans des carrières creusées au sein d'une formation carbonatée épaisse de 30 m et datée de l'Oligocène supérieur. Les faciès sont de type wackestone à grainstone, et sont associés à de fortes valeurs de porosité (variant de 25 à 45 %) et de perméabilité (comprises entre 5 et 20 D).

Les résultats présentés montrent la dynamique naturelle de l'hydrosystème où des expérimentations de fuite de CO<sub>2</sub> seront réalisées. Les transferts de matière entre la nappe et la ZNS sont étudiés via des réactions de précipitation/dissolution des minéraux carbonatés, modifiant la chimie des eaux et leurs réponses géophysiques. Les mesures répétées par tomographie de résistivité électrique (ERT) permettront de visualiser spatialement et temporellement les voies de migration de l'eau et du CO<sub>2</sub> ainsi que les zones réactionnelles.

Les premiers résultats permettent de comprendre les processus de transfert et l'évolution de la signature géochimique à travers la zone vadose jusqu'à la nappe, durant plusieurs cycles hydrogéologiques. Les transferts d'eau ont été obtenus par des mesures ponctuelles à différentes profondeurs via des sondes TDR (Time Domain Reflectometry) et des images spatiales obtenues par mesures ERT. Celles-ci ont été calibrées sur carotte en laboratoire, par l'étude de l'indice de résistivité et de la pression capillaire en fonction de la saturation en eau. En complément de ces expériences, un suivi géochimique des effluents et des éléments majeurs par chromatographie ionique est réalisé. Lors de la propagation des ondes de transfert hydriques dans la ZNS, les résultats mettent en évidence un déphasage temporel ainsi qu'une atténuation de celles-ci avec la profondeur. Cela s'explique par des modèles numériques, dépendants des caractéristiques pétrophysiques du milieu carbonaté.

**Mots-Clés:** Stockage géologique, Fuite de CO<sub>2</sub>, Hydrosystème, Zone non saturée, Nappe

\*Intervenant

## Qualité physico-chimique des eaux souterraines- cas de la zone du périmètre irrigué Guelma-Bouchegouf

Mounira Touati <sup>1</sup>, Moussa Benhamza <sup>1</sup>

<sup>1</sup> laboratoire de Géodynamique et Ressources Naturelles, Université Badji Mokhtar, B.P12 Annaba-Algérie – Algérie

La zone d'étude se caractérise par des potentialités agricoles importantes, surtout dans le périmètre irrigués Guelma-Bouchegouf. Les eaux souterraines constituent une ressource importante en eau potable, les études antérieures ont montré qu'elles sont sujettes à plusieurs types de contamination. Quinze points d'eau ont été échantillonnés dans la zone d'étude, 14 puits situés en milieu rural et un point au niveau d'oued Seybouse durant le mois de Novembre 2017.

L'objectif de ce travail est l'évaluation de la qualité des eaux de puits conformément aux normes de potabilité et d'irrigation et la détermination de la qualité globale sur la base d'une grille simplifiée comportant trois paramètres indicateurs de la pollution physico-chimique et azotée, qui sont la conductivité électrique, les teneurs en chlorures et en nitrates.

L'interprétation des résultats des analyses a montré que les eaux souterraines présentent deux faciès chimiques le sulfaté chloruré - calcique et le Sulfaté -Calcique.

L'étude de la qualité globale des eaux a révélé que 53% des points analysés sont de qualité moyenne, 13% sont de qualité mauvaise, et 34% sont de très mauvaise qualité.

Sur la base des résultats obtenus, il est important de souligner que la dégradation de la qualité des eaux souterraines est due essentiellement à la présence des nitrates qui sont liés à l'utilisation intensive des engrains dans le périmètre irrigué.

**Mots-Clés:** Guelma, Périmètre Irrigué, Eaux souterraines, Qualité, Pollution.

## Analyse hydrodynamique d'un système volcano sédimentaire artésien en contexte tropical – cas du volcan Bromo-Tengger (Indonésie).

Alix Toulier <sup>\*1</sup>, Herve Jourde <sup>1</sup>, Véronique De Montety <sup>1</sup>, Patrick Lachassagne <sup>2</sup>, Théophile Chomet <sup>1</sup>, Heru Hendrayana <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Hydrosciences Montpellier (HSM) - CNRS-IRD-Université de Montpellier - France

<sup>2</sup> Danone Waters - Groupe DANONE - France

<sup>3</sup> Universitas Gadjah Mada (UGM) - Indonésie

Le complexe volcanique du Bromo-Tengger comprend différentes sources minérales exceptionnelles et correspond par ailleurs à la zone de recharge de la plaine volcano-sédimentaire localisée au Nord du volcan. Cet aquifère artésien alimente en eau potable les populations locales mais est également utilisé pour l'irrigation des cultures. Les écoulements souterrains se localisent principalement au travers des laves andésitiques fracturées sur les flancs du volcan et au sein de matériel pyroclastique remobilisé dans la plaine. Certains de ces forages peuvent fournir plus de 35 L/s qui s'écoulent en surface par la simple pression qui réside au sein de l'aquifère(s) multicouche de la plaine de Pasuruan.

Pour améliorer la compréhension hydrogéologique de ce massif, une étude hydrodynamique a été menée sur le flanc et la plaine au Nord du volcan. Plusieurs stations climatiques ont été installées pour étudier le signal d'entrée. Le signal à l'exutoire est suivi grâce à l'instrumentation de certaines sources et forages artésiens. Une méthodologie originale a été mise en œuvre afin, d'une part, de mesurer les niveaux piézométriques dans les différents forages artésiens et, d'autre part, d'estimer les propriétés hydrodynamiques des niveaux artésiens recoupés par les forages. L'analyse du signal hydrodynamique entre la pluie et les sources/forages a permis de préciser les dynamiques du système liées à la forte recharge en saison des pluies. Les principaux axes de drainage et d'alimentation de la plaine ont pu être identifiés et permettent de préciser l'extension latérale de la zone de recharge, notamment la forte implication à l'Ouest de la caldera d'effondrement de Nongkojar. L'interprétation des essais par pompage au droit des forages artésiens a permis d'estimer les paramètres hydrodynamiques de la plaine, qui serviront à la réalisation d'un premier modèle numérique.

Bien que des interrogations subsistent encore sur l'implication de la caldera du volcan dans le système hydrogéologique, ces premières données hydrodynamiques permettent de préciser le modèle conceptuel du flanc Nord du volcan Bromo-Tengger jusqu'ici uniquement appuyé par les données géologiques et isotopiques.

**Mots-Clés:** système aquifère volcanique, artésien, source artésienne, forage artésien, aquifère multicouche, volcano, sédimentaire, volcan bromo, tengger, indonésie

\*Intervenant



## 13. GEOMORPHOLOGIE ET GEOLOGIE DE LA SURFACE



## **13.1. Les récents grands séismes // Tectonique salifère et argileuse // Tectonique active et morphogenèse**

## La faille Nord Anatolienne dans la région d'Iznik (Turquie) : évolution géomorphologique et archéosismicité

Yacine Benjelloun <sup>\*1</sup>, Julia De Sigoyer <sup>1</sup>, Hélène Dessales <sup>2</sup>, Sahin Mustafa <sup>3</sup>, Stéphane Garambois <sup>1</sup>,  
Julien Carcaillet <sup>1</sup>, Philippe Gueguen <sup>1</sup>, Laurent Baillet <sup>1</sup>, Yann Klinger <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) – Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux, INSU, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR219, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5275, Université Grenoble Alpes – France

<sup>2</sup> Archéologie et Philologie d'Orient et d'Occident (AOROC) – CNRS : UMR8546, École normale supérieure [ENS] - Paris – 45 Rue d'Ulm 75230 PARIS CEDEX 05, France

<sup>3</sup> Uludag Üniversitesi – Görükle Kampüsü, 16059 Nilüfer/Bursa, Turquie

<sup>4</sup> Institut de Physique du Globe de Paris, Sorbonne Paris Cité, UMR 7154 CNRS, F-75005, Paris, France – Institut de Physique du Globe de Paris – France

La faille Nord Anatolienne (NAF), une zone de faille dextre longue de 1000 km marquée par un fort aléa sismique, présente dans la région de Marmara une structure complexe. Elle se décompose en trois branches : la branche du nord (NNAF), la branche médiane (MNAF) qui borde le sud de la mer de Marmara, et la branche sud (SNAF). Alors que le comportement de la branche nord est bien connu, il y a beaucoup moins de données pour les autres branches. La faible activité mesurée aujourd'hui sur la MNAF contraste fortement avec les données historiques, archéologiques et paléosismologiques qui suggèrent l'occurrence d'au moins 6 séismes destructeurs sur cette branche depuis 2000 ans. Notre étude se propose de mieux contraindre le risque sismique sur la MNAF à partir d'une approche pluridisciplinaire et couvrant plusieurs échelles de temps. La MNAF se localise à proximité de la ville d'Iznik (anciennement Nicaea) qui fut un centre politique et religieux majeur aux périodes romaines, byzantines et ottomanes. Les vestiges de ces époques portent la trace de nombreuses déformations et réparations potentiellement liées à des séismes et font l'objet d'une étude archéosismologique qui permet de contraindre

l'âge des endommagements et de voir s'ils peuvent être causés par un séisme. Cet ensemble de données suggère au moins trois épisodes de déformation postérieurs au 6<sup>e</sup> siècle de notre ère. La quantité de dommages permet d'estimer des intensités locales de VIII sur l'échelle macroseismique européenne. Les déformations visibles sur un obélisque romain situé au nord de la ville ont été simulées numériquement et sont compatibles avec des magnitudes proches de Mw 7 pour des distances épcentrales inférieures à 15 km.

Le deuxième volet de notre travail vise à contraindre la vitesse de glissement Quaternaire sur la MNAF. Les principales failles autour du lac d'Iznik ont été cartées grâce à un MNT haute résolution dérivé d'images Pleiades. Un ensemble de morphologies décalées par la MNAF au sud du lac ont été systématiquement mesurées afin d'éclairer sa segmentation et de reconstruire l'historique des principaux séismes. L'analyse statistique de ces décalages a mis en évidence six ruptures majeures préservées dans le paysage, avec des déplacements cosismiques entre 2 et 6 m. La datation d'une terrasse lacustre incisée par des marqueurs décalés permet de contraindre une vitesse de glissement horizontal minimum de 5,4+/-2,4 mm/an pour l'Holocène.

**Mots-Clés:** faille Nord Anatolienne, Iznik, sismotectonique, archéosismologie, Pléiades

<sup>\*</sup>Intervenant

## Néotectonique dans la confluence de l'Aube et de la Seine

Pierre Benoit <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Aquanalyse – Chercheur indépendant – France

Depuis les années 1970, de nombreuses déformations souples sont décrites dans les terrasses alluviales du centre du bassin de Paris.

Les déformations les plus nombreuses et intenses furent décrites aux abords du croisement des failles de Bray-Vittel et Saint Martin de Bossenay, en confluence de l'Aube et de la Seine. Ces terrassesweichseliennes et Holocènereposent ponctuellement sur de la craie campanienne fortement indurées (vitesse sonique > 3000m/s) sans que l'on sache si ces craies sont bréchifiées ou dolomitisées.

L'exploitation depuis 2010, de granulats et sables, sur plus de quarante hectares, présente d'intenses déformations gravitaires souples ainsi que des failles normales et inverses, dans un contexte deltaïque à nombreux paléo chenaux, bien visibles également par panneaux électriques de conductivité. Ces paléo chenaux à remplissage limoneux sableux sont parfois varvés. S'y adjoignent des éjections verticales de sables et des structures en chaudrons, scellées (load cast ou poches périglaciaires) et des remontées de dômes crayeux bréchifiés pluri métiques.

Les déformations se montrent parfois polyphasées. Les plus récentes affectent la base de l'holocène. Diverses origines ont pu être évoquées.

L'effondrement karstique ne peut pas être retenue de par la proximité de la nappe.

Les phénomènes périglaciaires (poches en chaudron, déformation souple de mollisol, effondrement de cavités remplies de glace...) ne peuvent pas expliquer le polyphasage et les déformations tardives cassantes de la base de l'holocène. Il en est de même pour un hypothétique choc météoristique.

L'origine cosismique est privilégiée.

En effet, le cours de la Seine se cale sur la faille Vittel, sur plus de dix km, entre Méry/Seine et Marcilly/Seine

L'importante perméabilité des craies sous alluviales explique aisément leur fracturation hydraulique cosismique. Cette fracturation explosive induit de nombreux glissements gravitaires dans des sédiments gorgés d'eau, tout autant que des failles dans les sédiments plus indurés. Les déformations par le froid du fini glaciaires sont totalement insuffisantes pour expliquer toutes nos déformations et leur répartition géographique très localisée. L'intensité des déformations, tout autant que leur répartition spatiale et verticale, s'estompant dans un rayon de 30 km, indiquent au moins un séisme de magnitude supérieure à 5.

Une légère activité sismique existe encore actuellement.

**Mots-Clés:** bassin de Paris, Weichselien, ssds, séismites.

\*Intervenant

## Quantification des taux de dénudation de la séquence de terrasses corallieennes du Cap Laundi, Sumba (Indonésie), à partir du $^{36}\text{Cl}$ produit *in-situ*

Denovan Chauveau <sup>\*ψ1</sup>, Christine Authemayou <sup>1</sup>, Stéphane Molliex <sup>1,2</sup>, Kevin Pedoja <sup>3</sup>, Laurent Husson <sup>4</sup>, Lucilla Benedetti <sup>5</sup>, Vincent Godard <sup>5</sup>, Sri Yudawati Cahyarini <sup>6</sup>, Laurence Droz <sup>1</sup>, Mary Elliot <sup>7</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géosciences Océan (LGO) – CNRS : UMR6538, Université de Bretagne Occidentale [UBO] – France

<sup>2</sup> Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG) – CNRS : UMR7358, Université de Lorraine – Fr

<sup>3</sup> Morphodynamique Continentale et Côtier (M2C) – CNRS : UMR6143, Université de Caen – France

<sup>4</sup> Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) – CNRS : UMR5275, Université Grenoble Alpes – France

<sup>5</sup> Centre européen de recherche et d'enseignement de géosciences de l'environnement (CEREGE) – CNRS : UMR7330, Aix Marseille Université (Aix-en-Provence) : UM34, France

<sup>6</sup> Indonesian Institute of Sciences, Research Center of Geotechnology (LIPI) – Indonésie

<sup>7</sup> Laboratoire de Planétologie et Géodynamique (LPG) – CNRS : UMR6112, Université de Nantes – France

En raison de leur sensibilité aux changements climatiques et tectoniques, les récifs coralliens sont des bio-constructions souvent utilisés comme archives des changements environnementaux passés et notamment des paléo-niveaux marins. Sur le Cap Laundi (Sumba, Indonésie), les variations du niveau marin, associées au soulèvement tectonique, provoquent l'émergence d'une séquence de terrasses qui fossilisent les hauts niveaux marins (interglaciaires) du Quaternaire. Cependant, l'intensité relative des processus d'érosion affectant les terrasses corallieennes, après émergence, reste mal connue et peu quantifiée. Grâce aux concentrations en nucléide cosmogénique  $^{36}\text{Cl}$  produit *in-situ*, mesurés sur des échantillons prélevés sur les terrasses corallieennes du Cap Laundi, des taux de dénudation compris entre 4 et 72 mm/ka ont été estimés. Ces taux indiquent que l'érosion post-émergence n'est pas négligeable et qu'elle doit être plus systématiquement prise en compte dans les calculs de reconstitution des paléo-niveaux marins. D'autre part, notre étude met aussi en évidence des variations du taux de dénudation dépendant des zones morphologiques considérées. En effet, les taux de dénudation des échantillons récoltés sur les surfaces planes des terrasses sont plus élevés que ceux des zones présentant une pente (crêtes, falaises et pieds de falaises). Cette observation suggère que la dissolution des carbonates est le processus principal d'érosion affectant les terrasses émergées. De plus, les taux de dénudations semblent augmenter avec l'âge des terrasses, témoignant d'une meilleure efficacité de la dissolution chimique au cours du temps. Enfin, lorsque les taux de dénudation sont contraints, la concentration en  $^{36}\text{Cl}$  permet de préciser l'âge d'abandon de la terrasse, et ainsi, contribuer à une meilleure compréhension de la mise en place et de la dégradation des séquences de terrasses corallieennes au cours du Quaternaire.

**Mots-Clés:** Terrasses corallieennes, Taux de dénudation, Niveaux marins, Cosmonucléide, Géomorphologie

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: denovan.chauveau@univ-brest.fr

## Distribution et origine de la déformation actuelle dans un bassin intracontinental : le Delta de l'Okavango (Botswana)

Olivier Dauteuil <sup>\*1</sup>, Anne-Morwenn Pastier <sup>1</sup>, Mike Murray-Hudson <sup>2</sup>, Piotr Wolski <sup>3</sup>,  
Frédérique Moreau <sup>1</sup>, Nolwenn Portier <sup>4</sup>, Alain Crave <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Rennes – CNRS : UMR6118 – Université de Rennes1, Bâtiment 15, Campus de Beaulieu, CS 74205, F-35042 Rennes Cedex, France

<sup>2</sup> Okavango Research Institute (ORI) – Private bag 285 Maun, Botswana

<sup>3</sup> Climate Analysis Group (CSAG) – CSAG – EGS dept. University of Cape Town, Afrique du Sud

<sup>4</sup> Institut de physique du globe de Strasbourg (IPGS) – université de Strasbourg : UMS7516 – 5 Rue René Descartes 67084 STRASBOURG CEDEX, France

Le plateau sud-africain est classiquement considéré un domaine intraplaque stable, le dernier événement orogénique ayant eu lieu à la fin du Paléozoïque. Or il existe de nombreuses évidences d'une déformation interne dont l'origine est débattue, la propagation du rift est-africain vers le sud-ouest est l'une des hypothèses proposées (Pastier et al., 2018). Ces déformations diffuses ont conduit à la formation du graben de l'Okavango, l'un des plus grands écosystèmes endoréiques actuels au monde, contrôlé par un jeu de failles NE-SW. Afin de comprendre sa dynamique actuelle et future, nous avons estimé le champ de déplacement 3D du Delta de l'Okavango à partir de la déformation d'un réseau géodésique relevé par GPS tous les 2 ans et d'une étude structurale.

La composante horizontale affiche un mouvement latéral dextre avec un taux élevé inattendu : de 3 à 50 mm/an, croissant vers le NO. Ce résultat est compatible avec les travaux de Pastier et al. (2017) réalisé à partir d'un réseau régional plus large. La composante verticale montre une subsidence de 1 à 28 mm/an, à l'intérieur du Delta et un uplift de 1 à 20 mm/an à l'extérieur. L'analyse du champ de déformation montre une composante rotationnelle dans le Delta avec une faible extension perpendiculaire à la direction moyenne de la structure. Ce champ de déplacement correspond à un bassin en décrochement dextre, non pas à un rift comme classiquement admis. Les données géophysiques sont compatibles avec cette interprétation en montrant un très faible amincissement crustal.

Les taux de subsidence élevés sont compatibles avec le taux d'accumulation de sédiments allant de 5 à 15 mm/an selon l'âge proposé pour les sédiments plus anciens. Cependant, la différence d'au moins 10 mm/an reste significative. Nous proposons qu'elle soit due à l'effet de charge induite par le stockage en sédiments et en eau dans le Delta et les zones avoisinantes comme montré par les données GRACE (6,7 km<sup>3</sup>/an depuis 2002, Llovel et al., 2010) et par l'analyse hydrogéologique de Pastier (2018).

L'endoréisme du système et son évolution résulte du couplage de deux processus régionaux : la géodynamique (basin décrochant dextre) et l'hydrologie (cycle annuel et stockage en profondeur). Les deux processus produisent une subsidence à deux longueurs d'onde avec un signal périodique (cycle climatique annuel) et une tendance long terme (géodynamique et stockage permanent) qui pourraient expliquer la sismicité diffuse de la région.

**Mots-Clés:** bassin continental, GNSS, hydrologie, déformation, pull, apart

\*Intervenant

## Salt-like shale tectonics: A clay-kinesis mechanism proposed for the Ceduna Sub-Basin and its comparison with salt tectonics

Gulce Dinc <sup>\*ψ1</sup>, Jean-Paul Callot <sup>1</sup>, Jean-Claude Ringenbach <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA) - LFCR, E2S-UPPA - France

<sup>2</sup> TOTAL S.A. - CSTJF, Pau - France

Rocks can behave in a ductile manner under certain conditions and parameters depending on distributed deformation and scale of observation. Parameters controlling these processes can be summarized as: confinement pressure, temperature, water content and/or speed of loading. For salt and shale, small-scale deformation mechanisms give those rocks the ability to behave as a ductile/viscous material on large time-scales enabling them to be described or modeled as a 'fluid'. The scale of deformation for salt is much smaller than shale but the mechanism can be explained with the same principle. 'Shale Diapirism', which has been observed during 80s but later discarded, depends on the ability of deformation mechanisms to distribute the strain at very small grain-scales and long time-scales.

During the last decade, several realistic examples for salt-like shale tectonism have been proposed. Here, we investigate a shale-prone domain based on a 3D seismic dataset collected from Ceduna Sub-Basin (see Espurt et al., 2009). PSDM data offers great imaging of the thickened clay section. Within the White Pointer Delta interval (Late Albian-Cenomanian), time slices and seismic lines display two distinctively different structural domain; a gravitationally gliding delta system dominated by listric faults through proximal-to-central part of the delta and a domain of minibasin-like structures separated by mobilized shale at the distal part of the delta. Both of these domains sole into the thickened Blue Whale shale interval (Albian), underlying the White Pointer Delta as the main detachment level. At this stage of work, we will be presenting the seismic evidences for massive shale mobilization from Ceduna, constructed cross-sections showing the transition from gravitationally gliding delta system into the mobilized-shale area, time-slice evaluation and the initial kinematic scenario we propose for the clay-kinesis observed in the area. There are localized/strongly distributed inner deformation mechanisms defined for shale and various seismic data examples show that clay behaves as a 'fluid' on big scale while still being brittlely deformed on small scale. Based on existing knowledge and ongoing research, our ultimate goal is to rebuild the long-term clay motion and demonstrate clay-kinesis mechanisms occurring in natural cases utilizing both seismic data and outcrop findings from various shale-prone parts of the world such as Ceduna, Niger Delta, Barbados/Trinidad, Myanmar and Iran.

**Mots-Clés:** Shale Tectonics, Clay, Kinesis, Great Bight Basin, Ceduna Sub, Basin

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: gulcedinc@hotmail.com

## Les "rideaux" du paysage crayeux du NW du Bassin de Paris : une combinaison tectonique, cryoclastique et karstique favorisant une circulation hydrogéologique

Anne Duperret <sup>\*ψ1</sup>, Sara Vandycke <sup>2</sup>, Jean-Pierre Colbeaux <sup>3</sup>, Brigitte Van Vliet-Lanoe <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC) - CNRS : UMR6294, Université Le Havre Normandie, France. – France

<sup>2</sup> Université de Mons (UMons) – 20, place du Parc, B7000 Mons, Belgique

<sup>3</sup> Université des Sciences et Technologies de Lille - France

<sup>4</sup> UBO Domaines océaniques – Université de Bretagne Occidentale [UBO] – Institut Universitaire Européen de la Mer, 29380 Plouzané, France

Le développement récent des techniques de LiDAR aérien permet la production de MNT de surface à haute résolution, sur lesquels les structures d'ordre métrique apparaissent nettement. C'est le cas de certaines structures superficielles de la craie du NW du Bassin de Paris, particulièrement bien développées dans la craie de la région Hauts-de-France. Il s'agit de rides superficielles, de plusieurs dizaines de mètres de long, d'une hauteur de plusieurs mètres, formant des structures longilignes et parallèles aux pentes de vallées, appelées localement " rideaux ". Ces structures marquent les pentes de certaines vallées sèches et sont particulièrement bien développées dans la craie du bassin de Paris, située au NE de la faille du Bray. Leur origine est toujours autant discutée au sein des communautés de géologie, géographie, archéologie et pédologie. Les affleurements de falaises littorales le long des côtes de Picardie tronquent une dizaine de systèmes de vallées sèches NW-SE, souvent courtes et perchées, orientées transversalement au trait de côte NE-SW. L'une d'entre elle, observée au Bois de Cise, montre le développement de rideaux connectés à un système de failles normales conjuguées. Ce site permet l'observation terrain en 3D de ce système. L'ensemble de la structure forme un " step-graben ", composé de failles en relai et rampes, impliquant des niveaux de craie cryogénisée et des résidus de couverture de loess quaternaire. Ces failles à rideaux favorisent les circulations d'eaux continentales, comme en témoigne les sources actuelles observées à la base des rideaux en sommet de falaise, ainsi que le développement de karsts au pied des failles en falaise. Ce système faillé à fonction hydrogéologique se développe sur une épaisseur minimale de 100m et résulte du dernier champ de contraintes extensif régional NNW-SSE enregistré dans la partie normande et picarde du bassin de Paris. Par ailleurs, la plupart de ces failles montrent des structures d'éclatement qui témoignent du rôle des fluides sous pression (liquides ou gelés) sur leur développement. Les vallées sèches à rideaux du Bois de Cise ne sont pas à relier à une tête de réseau hydrographique secondaire aujourd'hui disparu, mais plutôt à la trace d'un épikarst, implanté sur une structure d'effondrement thermokarstique, favorisant la circulation hydrogéologique actuelle.

**Mots-Clés:** faille, tectonique, craie, karst, cryoclastie

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: anne.duperret@univ-lehavre.fr

## Interaction of blind foldbelt and fluvial system in Bangladesh: Avulsion of the Meghna River

Celine Grall <sup>\*ψ1</sup>, Michael Steckler <sup>1</sup>, Audrey Dunham <sup>1</sup>, Dhiman Ranjan Mondal <sup>2</sup>, Haresh Rajapara <sup>3</sup>, Basu Kumar <sup>4</sup>, Steve Goodbred <sup>5</sup>, Syed Humayun Akhter <sup>4</sup>, Ashok K Singhvi <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) – États-Unis

<sup>2</sup> MIT Parsons Laboratory – États-Unis

<sup>3</sup> Physical Research Laboratory, Ahmedabad – Inde

<sup>4</sup> Dhaka University – Bangladesh

<sup>5</sup> Vanderbilt University – États-Unis

Channel migrations and river avulsions in deltaic river systems are mainly driven by autocyclic processes, however, tectonic events, such as earthquakes, may also lead to avulsions from sudden uplift. In this study, we are jointly analyzing the Holocene history of the Meghna river and the tectonic activity in the Ganges-Brahmaputra-Meghna Delta (GBMD) by using stratigraphic logs of hand-drilled wells (including sediment analyses and OSL and C14 dating), resistivity profiles and numerical modelling. In the eastern part of the delta, the Meghna River occupies a region that is underlain by the blind megathrust of the IndoBurma foldbelt. We reconstruct the Holocene history of a 100 km long sinuous abandoned channel that we interpreted as a paleo-tributary of the Meghna River. This abandoned channel is located east of the current river channel and north of the Holocene Old Meghna Estuarine Floodplain soils. We show that the abandoned channel was connected by the Titas river to the uplifted Old Meghna Estuarine Floodplain that is now 10 m above present sea-level in average. As a result of the uplift, part of the Titas River now flows northward, in the opposite direction of the southward flowing rivers of the delta. Reconstruction of the abandoned channel history suggests that the channel has been active in between 8079+/-187 yr and 2600+/- 150 yr ago. We employ elastic Coulomb dislocation modelling to evaluate the hypothesis that the co-seismic uplift associated with an earthquake could have triggered the abandonment of the channel. The fault system geometry used is estimated using geologic and GPS constraints. We explore different potential nucleation depths and variable fault geometry that involves the megathrust only, a splay fault only, or the megathrust terminating in the splay. We estimate the minimum conditions of any class of earthquakes that can produce the amount of uplift (1-2 m) necessary for triggering the river avulsion. Our study aims to address the earthquake-related processes that may occur in the event of an earthquake in the highly populated GBMD.

**Mots-Clés:** Delta, River avulsion, Tectonics, Active faults, Co seismic uplift

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: cgrall@ldeo.columbia.edu

## Interaction of the Dauki Fault System and fluvial system in Bangladesh: Avulsion of the Brahmaputra River during the Holocene

Celine Grall <sup>\*1</sup>, Michael Steckler <sup>1</sup>, Steve Goodbred <sup>2</sup>, Christopher Small <sup>1</sup>, Syed Humayun Akhter <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) - États-Unis

<sup>2</sup> Vanderbilt University - États-Unis

<sup>3</sup> Dhaka University - Bangladesh

Channel migrations and river avulsions in deltaic river systems are mainly driven by autocyclic processes, however, tectonics that include long-term subsidence and uplift, and sudden seismic events, such as earthquakes, may also lead to avulsions. In this study, we are analyzing the Holocene river history of the Brahmaputra river together with active deformation and subsidence pattern along the course of the river, by using stratigraphic logs of hand-drilled wells, and seismic imaging. The Brahmaputra is a braided river whose channels and islands migrate every year. The Brahmaputra and the Ganges drain three-quarters of the Himalayas and supply > 1GT/y of sediment to the Ganges Brahmaputra Meghna delta (GBMD). North of the GBMD subsiding plain, the Brahmaputra River is cross-cut by the Dauki thrust fault system that accommodates 3-7 mm/yr of convergence. We have used seismic data along the river in order to determine the deformation at shallow depth. A 10 kyr old buried erosional unconformity appears offset by sub-vertical faults. These two fault branches correspond to the eastward continuation of the Dauki fault that splay in two branches, west to Shilong Plateau. These two splay faults limit a small active subsiding basin. Cumulative vertical displacements accumulated over the last 10 kyrs along these two fault branches is about 24 meters, suggesting that this fault system accommodates almost half of the present convergence rates. Five avulsions of the Brahmaputra River among 3 different pathways occurred during the Holocene in this area. Remarkably, river avulsion nodes appear to be localized by the two fault branches, suggesting that tectonic activity of these faults may have triggered avulsions. Overall, the river mobility of the Brahmaputra during the Holocene is significantly higher in the Dauki fault system than in the southern deltaic plain where subsidence rates gently increase in the seaward direction. Our study aims to address the earthquake-related processes that may occur in the event of an earthquake in this highly populated region.

**Mots-Clés:** Delta, River avulsion, Tectonics, Active faults, Subsidence

<sup>\*</sup>Intervenant

## Croissance du pli de Qiulitagh au front sud de la chaîne plissée de Kuqa, Tian Shan, Chine

Fabien Graveleau <sup>\*1</sup>, Bernard Delcaillau <sup>2</sup>, Maryline Le Béon <sup>3</sup>, Gang Rao <sup>4</sup>, Julien Charreau <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – Université de Lille, CNRS : UMR8187, Université du Littoral Côte d'Opale – France

<sup>2</sup> Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C) – Normandie Univ, UNICAEN, UNIROUEN, CNRS : UMR6143 – France

<sup>3</sup> National Central University, Department of Earth Sciences (NCU) – Taïwan

<sup>4</sup> Zhejiang University, School of Earth Sciences – Chine

<sup>5</sup> Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG) – Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7358 – France

La compréhension de la dynamique des paysages dans les chaînes de montagnes impose d'analyser rigoureusement les mécanismes de formation et d'évolution des reliefs aux différentes échelles spatio-temporelles. Du point de vue géomorphologique, l'étude approfondie des relations entre les formes élémentaires et les structures géologiques (plis et failles) doit être poursuivie pour comprendre comment elles enregistrent l'histoire des stades stationnaires ou transitoires des reliefs, à moyen et court-terme (105-6 ans). Progresser autour de cette problématique exige d'améliorer la relation entre les observables géomorphologiques et les quantifications des états topographiques et cinématiques du relief. Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons à une structure tectonique active, le pli de Qiulitagh, dans le piémont sud du Tian Shan (province du Xinjiang, Chine) où nous avons entrepris trois tâches complémentaires : 1) la quantification du taux de soulèvement de la structure; 2) la quantification des taux d'érosion; et 3) l'étude des variations du niveau de base local. La première tâche a débuté avec la mesure topographique à partir de MNT de drone et l'échantillonnage pour datation OSL de terrasses fluviatiles déformées préservées le long d'une rivière recoupant le pli. La seconde tâche repose sur la mesure des taux de dénudation récents estimés aux exutoires de bassins versants drainant le pli (méthode cosmogénique  $^{10}\text{Be}$  sur sédiment détritique). Enfin la troisième tâche cherche à caractériser la dynamique du niveau de base local des cônes alluviaux au pied du relief plissé, et notamment leur dynamique d'aggradation / incision. L'objet de cette communication sera de faire le point sur l'état d'avancement ce travail et d'exposer des premiers résultats.

**Mots-Clés:** Géomorphologie quantitative, pli actif, réseau de drainage, Tian Shan, Chine

\*Intervenant

## Experimental tectonic geomorphology along an active thrust, normal fault and strike-slip fault

Fabien Gravelleau <sup>\*1</sup>, Dominguez Stéphane <sup>2,3</sup>, Jacques Malavieille <sup>2,3</sup>, Vincent Strak <sup>4</sup>,  
Isabelle Manighetti <sup>5</sup>, Christian Romano <sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – Université de Lille, CNRS : UMR8187, ULCO – France

<sup>2</sup> Géosciences Montpellier (GM) – CNRS : UMR5243, Université Montpellier II - Sciences et techniques – France

<sup>3</sup> Observatoire de REcherche Méditerranéen de l'Environnement (OSU OREME) – Université Montpellier 2 - Sciences et Techniques, CNRS : UMS3282 – France

<sup>4</sup> Vrije Universiteit Amsterdam [Amsterdam] (VU) – Pays-Bas

<sup>5</sup> Géoazur (GEOAZUR) – Observatoire de la Côte d'Azur, Sophia Antipolis 06560 VALBONNE, France

Tectonically controlled landforms develop morphologic features that provide useful markers to investigate crustal deformation and relief growth dynamics. Knowledge of the coupling between tectonics and climate dependant processes (erosion-transport-sedimentation) is fundamental to better approach genesis and evolution of earth landforms. We present results of geomorphic experiments obtained with an innovative approach combining tectonics and surface processes, coupled with accurate monitoring techniques. This approach allows for a qualitative and quantitative analysis of landscape evolution in response to active deformation in three end-member settings: compressional, extensional, and strike-slip. Results first outline that experimental morphologies evolve significantly at a short time scale. Numerous morphologic markers form continuously, but their lifetime is generally short because erosion and sedimentation processes tend to destroy or bury them.

For the compressional setting, the formation of terraces above an active thrust appears mainly controlled by narrowing and incision of the main channel through the uplifting hanging-wall and by avulsion of deposits on fan-like bodies. Terrace formation is irregular even under steady tectonic rates and erosional conditions. Terrace deformation analysis allows retrieving the growth history of the structure and the fault slip rate evolution.

For the extensional setting, the dynamics of hanging-wall sedimentary filling controls the position of the base level, which in turn controls footwall erosion. Two phases of relief evolution are characterized: a phase of relief growth, and a phase of upstream propagation of topographic equilibrium, first reached in the sedimentary basin. During relief growth, triangular facets develop by degradation of the fault scarp, and their geometry (height) becomes stationary during the second phase.

For the strike-slip setting, the complex morphology and segmentation of the wrench fault zone, enhances interactions with the drainage network. Because of the widening of the fault zone toward the surface, a significant amount of distributed deformation is observed along the wrench zone. Locally, where two terminations of fault segments interact, less than a quarter of the far field displacement remain measurable using fault offsets, leading to a systematic underestimation of the real fault slip rate.

**Mots-Clés:** Modélisation expérimentale, Géomorphologie, Dynamique des reliefs, Faille active

\*Intervenant

## Déformation active de la chaîne du Kunlun Occidental (Xinjiang, Chine)

Christelle Guilbaud <sup>\*1</sup>, Martine Simoes <sup>1</sup>, Laurie Barrier <sup>1</sup>, Jerome Van Der Woerd <sup>2</sup>, Haibing Li <sup>3</sup>, Jiawei Pan <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) – Institut de Physique du Globe de Paris – France

<sup>2</sup> Institut de physique du globe de Strasbourg (IPGS) – université de Strasbourg, INSU, CNRS : UMR7516 – 5 Rue René Descartes 67084 STRASBOURG CEDEX, France

<sup>3</sup> Laboratory of Continental Dynamics, Institute of Geology - Chinese Academy of Geological Sciences – Beijing, Chine

<sup>4</sup> Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences – Chine

La chaîne du Kunlun Occidental (Xinjiang, Chine), située sur la bordure nord-ouest du plateau du Tibet et bordant le sud du bassin endoréique du Tarim, est une chaîne de montagnes à déformation lente encore largement méconnue du point de vue des aléas naturels. Les séismes historiques du 20<sup>e</sup> siècle, dont le séisme de Pishan du 3 juillet 2015 (Mw 6.4) au front de la chaîne, nous rappellent toutefois que cette région est bien sismiquement active. Notre récente étude morphologique et structurale de la zone épicentrale de ce séisme nous a permis d'identifier la faille ayant rompu. Il s'agit d'une rampe frontale située sous ~8-9 km de sédiments Cénozoïques et reliant deux niveaux de décollements dont le plus superficiel émerge en surface ~180 km plus au nord dans le bassin du Tarim. Ainsi, les dimensions extrêmes de ce décollement superficiel posent la question de la possibilité de grands séismes dans cette région. Afin de mieux contraindre la manière dont la déformation est accommodée sur cette structure, nous nous intéressons au front de déformation, au niveau du pli du Mazar Tagh en plein cœur du Tarim. Malgré l'aridité actuelle de cette région, un certain nombre de terrasses fluviales ont été identifiées et indiquent que des paléo-rivières ont traversé le bassin et permis l'érosion de ce pli. Ces terrasses ont été échantillonnées pour datation OSL et 10Be sur le terrain. En utilisant des images et des MNT Pléiades, nous avons cartographié précisément ces terrasses afin de quantifier la déformation qu'elles ont enregistré. Notre étude apporte ainsi des contraintes essentielles à la compréhension de la tectonique active et de l'évolution morphologique et climatique de cette région.

**Mots-Clés:** Bassin du Tarim, Kunlun Occidental, Déformation active, Géomorphologie, Aléa sismique

\*Intervenant

## Le séisme de magnitude 7.8 Kaikōura, Nouvelle Zélande: observations géologiques et géophysiques, modèles dynamiques de source et impact régional

Caroline Holden <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> GNS Science (GNS) - Nouvelle-Zélande

The 2016 M7.8 Kaikōura, New Zealand, earthquake stroke the East coast of the northern South Island on November 13th 11:02 (UTM). The damaging earthquake generated extreme surface displacements, land deformations and ground motions, a regional tsunami and triggered significant slow slip events on the Hikurangi interface (Kaneko et al., 2017). Sadly, it also caused 2 fatalities and many New Zealanders were affected by this earthquake.

The earthquake ruptured the surface along 150 km of distance onshore and offshore. Geologists have recorded extreme rupture displacements, including vertical motions of more than 10 m and horizontal displacements over 11 m (Stirling et al., 2017). Geodetic, geological and marine geophysics data suggest that more than 16 faults were involved in the earthquake rupture (Hamling et al., 2017). The earthquake generated extreme ground motions in the epicentral regions with over 1g recorded in the epicentral areas (Kaiser et al., 2017). It also generated ground motions that exceeded design levels for particular building periods in the Wellington region (Kaiser et al. 2016). Subsequently many buildings in Wellington were affected with some of them requiring to be demolished. Ground shaking also triggered over 100,000 landslides in the epicentral region (Dellow et al., 2017).

The overall earthquake rupture process as suggested by advanced source models (Hamling et al., 2017; Holden et al., 2017; Kaiser et al., 2017; Bradley et al., 2017) is complex and unexpected. The earthquake bypassed the Hope fault, largest source of regional seismic hazard, as it ruptured exclusively to the North (despite most of the stress accumulated from the 2010-2016 Canterbury earthquake sequence was to the South). Source models based on teleseismic and/or regional data suggest that the interface did contribute to the overall rupture (Bai et al., 2017; Duputel & Rivera, 2017; Kaiser et al., 2017). However, many observations strongly support evidence of minor (if any) contribution of the interface in the overall rupture (Holden et al., 2017; Clark et al., 2017; Cesca et al., 2017). These unexpected source characteristics are not considered into best practice (ie seismic hazard models) but significantly impact ground motion results.

**Mots-Clés:** Kaikoura earthquake, Ground motion, Kinematic source models, New Zealand, Sub-duction, Crustal earthquake

<sup>\*</sup>Intervenant

## Using salt tectonic structures as proxies to reveal post-rift crustal tectonics: The example of the Eastern Sardinian margin

Gaël Lymer <sup>\*1,2</sup>, Bruno Vendeville <sup>2</sup>, Virginie Gaullier <sup>2</sup>, Frank Chanier <sup>2</sup>, Morgane Gaillard <sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Geography, Earth and Environmental Sciences, University of Birmingham – Royaume-Uni

<sup>2</sup> Laboratoire d’Océanologie et de Géosciences (LOG - UMR 8187 CNRS-Lille1-ULCO) Université Lille I - Sciences et technologies – Sciences et technologies – France

Rifting of the Eastern Sardinian margin, Western Tyrrhenian Sea, and subsequent sea-floor spreading occurred from the Late Miocene to present-day. In addition, the Messinian Salinity Crisis (MSC), led to the accumulation of a mobile salt layer (the Mobile Unit, MU), in the whole Mediterranean Basin from 5.97 to 5.33 Ma, during the lithospheric extensional period. The Western Tyrrhenian Basin is thus a fascinating basin in terms of interactions between crustal tectonics, salt tectonics and sedimentation.

Although the rifting ended before the MSC across the Western Tyrrhenian Sea, a surprising crustal activity has persisted on the Eastern Sardinian margin during the Pliocene, locally up to recent Quaternary times. These crustal post-rift deformations involved both extensional and compressional structures and were particularly observed on the proximal margin, where the salt layer is thin or absent.

In this study, we investigate the salt tectonics in the deeper margin, *i.e.* the Cornaglia Terrace, where the MU accumulated during the MSC, to test if post-MSC crustal tectonics also persisted across the distal margin. This is a challenge where the MU is thick, because potential basement deformation could be partly or totally accommodated by lateral or vertical flow of the salt and therefore would not be transmitted into the supra-salt layers (Upper Unit and Plio- Quaternary). Our investigations clearly reveal interactions between crustal and salt tectonics along the margin, implying a reactivation of some crustal structures after the end of the rifting. We then illustrate examples of different responses of the salt and its overburden to sub-salt crustal movements along the Eastern Sardinia margin, supported with results from analogue modelling experiments. Particularly, these models were crucial to demonstrate how crustal vertical motion have been cushioned by concurrent gravity gliding and lateral flow of an initially tabular salt layer, which thinned upslope and inflated downslope, keeping the overlying sediments remained sub-horizontal.

Such interactions between thin-skinned and thick-skinned tectonics highlight how the analysis of the salt tectonics is a powerful tool to reveal recent deep crustal tectonics along salt-bearing rifted margins.

**Mots-Clés:** Rifting, Post, rift reactivation, Salt tectonics, Analogue modelling, Gravity gliding, Salt flow

\*Intervenant

## Modeling the interaction between slip events, erosion and sedimentation along active strike-slip faults: insights from geomorphic experiments

Jacques Malavieille <sup>\*1,2</sup>, Stéphane Dominguez <sup>1</sup>, Fabien Graveleau <sup>3</sup>, Isabelle Manighetti <sup>4</sup>,  
Adélaïde Ferdinand <sup>1</sup>, Christian Romano <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Montpellier (GM) - CNRS : UMR5243, Université Montpellier II - Sciences et techniques - France

<sup>2</sup> Observatoire de REcherche Méditerranéen de l'Environnement - Université Montpellier 2, CNRS : UMS3282 - Fr

<sup>3</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - UMR 8187 (LOG) - CNRS : UMR8187 - France

<sup>4</sup> Géoazur (GEOAZUR) - Observatoire de la Côte d'Azur - Bât 1, 250 rue Albert Einstein Les Lucioles 1, Sophia Antipolis 06560 VALBONNE, France

Recovering information on past (i.e., last 102-104 yrs) large earthquakes on faults is a challenge and a critical issue for this information might help determining the magnitude and the recurrence mode of the largest events on a given fault. Fault-controlled landforms develop morphologic features that provide useful markers to investigate this issue. Indeed, most of the morphological, structural and sedimentary markers that are observed along a major seismogenic fault result from or are shaped by the large earthquake slips that repeated on this fault over its seismogenic history. Therefore, offset markers preserve information on past large earthquakes, especially on the slip amplitudes they produced at surface. Yet the relevance of this information depends on whether the slip-recording markers that are used for slip analyses maintained well preserved in the morphology while the fault and the landscape were evolving. This important question is difficult to tackle with natural data, for fault and landscape evolution cannot be monitored over the relevant long time spans. Therefore, to address it, we have developed an original experimental set-up made to simulate repeated slip events on a strike-slip fault placed in a wet environment (rainfall system) sustaining significant sedimentation and erosion. The analog material is a mix of granular materials, whose mechanical properties lead to a geometric scaling of about 1:10 000 and to a temporal scaling on the order of one second equivalent to a few dozens of years. We survey the formation and evolution of a strike-slip fault from its immature stages up to one hundred repeated slip events. Under the combined effects of accumulating slip, erosion and sedimentation, the model surface exhibits tectonic and morphological structures similar to natural features (Riedel's shears, pressure and shutter ridges, pull-apart basins, alluvial fans, terrace risers, braided rivers, etc), whose space and time evolution can be precisely analyzed using accurate monitoring techniques. Deformation partitioning, sequential formation of alluvial terraces, stream captures, development of 'traps' filling with sediments, etc, are observed. The control on the imposed amplitude and frequency of the rainfall cycles allows to examine the impact of these rainfalls on the fault morphology and on the evolution of the associated morphological markers. Finally, we can compare the imposed slip events (number, amplitudes, repeat times) with the cumulative offsets eventually preserved and measurable at the model surface. Significant discrepancies are found between originally imposed and finally preserved offsets which shed light on the large uncertainties that may affect the morphological and paleoseismological analyses commonly applied on natural faults.

**Mots-Clés:** slip events, geomorphic experiment, erosion, sedimentation, strike, slip fault

## Campagne WestMedFlux : premières interprétations sur les relations entre déformation du sel et flux de chaleur en Méditerranée Occidentale

Bellucci Massimo <sup>\*ψ1,2,3</sup>, Jeffrey Poort <sup>4</sup>, Marina Rabineau <sup>1</sup>, Francis Luazeau <sup>5</sup>, Daniel Aslanian <sup>2</sup>, Maryline Moulin <sup>2</sup>, Estelle Leroux <sup>2</sup>, Romain Pellen <sup>6</sup>, Christian Gorini <sup>4</sup>, Damien Do Couto <sup>4</sup>, Frédérique Rolandone <sup>4</sup>, Anna Del Ben <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géosciences Océan (LGO) – CNRS : UMR6538 – France

<sup>2</sup> Unité de recherche Géosciences Marines (Ifremer) (GM) IFREMER – France

<sup>3</sup> Dipartimento di Matematica e Geoscienze, Università di Trieste – Italie

<sup>4</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTEPI) – Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, CNRS : UMR7193, Fr

<sup>5</sup> IPGP – Institut de Physique du Globe de Paris – Paris, France

<sup>6</sup> Geosciences Océan, UMR 6538, Brest – CNRS : UMR6538 – IUEM, 1 Place N. Copernic, 29280, Plouzané, France

Les campagnes WestMedFlux 1 (20/04-15/05/2016) et 2 (12-25/04/2018) avec le N/O Atalante ont permis d'enrichir d'environ 190 nouvelles mesures les données de flux de chaleur de la Méditerranée Occidentale. Ces mesures sont, en majorité, situées et alignées sur des profils sismiques des bassins Liguro-Provençal et Algéro-Baléarique, de manière à couvrir les marges conjuguées. Le contexte de la Méditerranée Occidentale, son âge récent, sa croûte atypique et la variabilité de sa TOC en font une zone idéale pour contraindre le régime thermique profond et tester différents modèles thermo-mécaniques. En plus, des études récentes réalisées dans le bassin Liguro-Provençal (*Leroux et al., review*), dans les marges de l'Atlantique du Sud (basins d'Angola et Santos) et dans le Golfe du Mexique montrent une coïncidence entre la structuration du sel et le changement de nature du substratum. Cette présentation se focalisera sur la première partie de l'interprétation des données de la mission WestMedFlux, sur les corrections effectuées et surtout sur le rapport entre les flux de chaleur et la déformation salifère. Le sel a un impact important sur la thermicité de la marge car sa conductivité thermique est bien supérieure à celle des roches sédimentaires. En effet, la conductivité de l'halite est comprise entre 4.8 et 6.5 W/m/K contre seulement 1 à 2 W/m/K pour les roches sédimentaires (*Clauser and Huenges, 1995*). Les structures salifères agissent donc comme un conduit pour le transport de chaleur qui sera perturbée en surface. L'objectif de cette étude est de mieux contraindre l'effet du sel sur la température mesurée en surface mais aussi de tester l'hypothèse d'une influence thermique sur la déformation salifère. L'étude réalisée comprend l'analyse ponctuelle des flux de chaleur, associée à l'interprétation chrono-stratigraphique et à la modélisation thermo-cinématique des marges. Les premiers résultats de ces relations permettront de mieux comprendre et différencier les effets locaux de la sédimentation sur la température en surface, y compris la réfraction du sel, et le signal thermique d'origine profonde lié à la nature crustale du substratum.

*Clauser, C., Huenges, E., 1995. Thermal Conductivity of Rocks and Minerals, in: Rock Physics & Phase Relations. American Geophysical Union, pp. 105–126. doi: 10.1029/RF003p0105*  
*Leroux, E., Aslanian, D., Rabineau M., Gorini, C., Rubino, J.-L., Blanpied, C., & Poort, J., Atlas of the Stratigraphic markers in the Western Mediterranean Sea with focus on the Gulf of Lion, review.*

**Mots-Clés:** Méditerranée Occidentale, tectonique salifère, flux de chaleur, WestMedFlux, segmentation croûte

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: massimo.bellucci@univ-brest.fr

## Etude gravimétrique des diapirs triasiques dans le bassin néogène de Guercif (Maroc oriental)

Ibtissam Rezouki <sup>\*1</sup>, Mustapha Boujamaoui <sup>2</sup>, Mohamed Rouai <sup>1</sup>, Ahmed Manar <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Moulay Ismail University, Faculty of Sciences of Meknes, Earth Sciences Department, Meknes, Maroc

<sup>2</sup> URGGFS, Département de la géologie, Faculté des Sciences et techniques, Errachidia – Université Moulay Ismail.  
BP 509, Boutalamine, 52000 Errachidia, Maroc

<sup>3</sup> Geology Direction, Ministry of Energy, Mines and sustainable development, Rabat, Maroc

Le bassin de Guercif occupe une position très particulière, dans la partie orientale du Maroc, à cause de son emplacement à un nœud structural, ce que laisse prévoir une tectonique assez complexe et tourmentée. Cette tectonique se manifeste au niveau du bassin par des plis localisés plus au moins aigus caractérisés, en général, par des remontées de dépôts triasiques appelées aussi diapirs (tectonique salifère). Ces corps diapiriques sont en nombre de trois diapirs à savoir ; le diapir de Bou Msaad, d'Elmongar et celui de Rhogia. Dans le but d'étudier la réponse gravimétrique de ces diapirs et de mettre en évidence des nouveaux corps diapiriques profonds, une analyse des données gravimétriques disponibles a été faite. Ainsi, l'interprétation de la carte d'anomalie de Bouguer et celle d'anomalie résiduelle en correspondance avec la géologie de surface nous a permis d'attribuer certaines anomalies négatives de forme subcirculaire ou quelconque à des zones de venues triasiques, en général salifère, signalées sur la carte géologique du bassin ou masquées par la couverture tertiaire et quaternaire. D'une autre part l'application des filtres permettant la détection des linéaments gravimétriques sur la carte d'anomalie résiduelle a permis d'identifier et caractériser des failles profondes qui peuvent avoir un rôle très important dans la remonté des dépôts triasiques.

**Mots-Clés:** gravimétrie, diapir triasique, bassin de Guercif, Maroc

\*Intervenant

## L'épigénie d'aggradation, un concept sous-utilisé aux implications multiples et une clé de lecture géologique et géomorphologique sur tout le pourtour méditerranéen

Jean-Loup Rubino <sup>\*1</sup>, Ludovic Mocochain <sup>2</sup>, Olivier Parize <sup>3</sup>, Jean-Pierre Suc <sup>4</sup>

<sup>1</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) - France

<sup>2</sup> Consultant Lens en Vercors - Consultant Lens en Vercors - France

<sup>3</sup> ORANO - ORANO - France

<sup>4</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTEPI) - Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7193, UPMC Univ Paris 06, Sorbonne Univ, CNRS, Inst Sci Terre Paris ISTEPI - France

L'épigénie est " le phénomène par lequel une rivière qui coulait sur une surface plane s'encaisse par érosion ". L'épigénie d'aggradation est le processus génétique par lequel une rivière en aggradiant son cours, donc en construisant un piémont, est capable de s'extraire d'une paléo-vallée où elle était initialement confinée, de migrer latéralement au-dessus d'un paléo-interfluve, voire de franchir des reliefs pour ré-inciser dans un substratum différent de son substrat initial. Ce concept, introduit par Baulig (1928), popularisé par Clauzon et al. (1992), Clauzon (1999) et Clauzon et al. (2015) est un cas spécifique d'épigénie dont l'explication génétique mérite d'être beaucoup plus largement diffusée. Il dérive des observations faites sur la succession: Messinien- Pliocène- Quaternaire du pourtour méditerranéen et est intrinsèquement liée à la Crise de salinité messinienne qui voit se succéder trois périodes antagonistes: 1/ le très bas niveau marin du Messinien de la Méditerranée (-1500m+), pendant lequel vont se creuser de profonds canyons subaériens ; 2/ à cet extrême bas niveau font suite les très hauts niveaux marins pliocènes (+40, +70m) aux cours desquels, les progradations deltaïques s'accompagnent d'une forte aggradation continentale et de la construction de piémonts ; 3/enfin au cours du Quaternaire, en relation avec les cycles climatiques et des surrections locales, l'incision reprend, mais le nouveau tracé de la rivière se trouve alors fréquemment décalée par rapport aux canyons messiniens. C'est le long de la vallée du Rhône et de ses affluents que le phénomène est le mieux décrit, Clauzon et al. (1996) où des sections complètes du fleuve actuel sont décalées du tracé messinien ; mais ce processus affecte aussi le Var et l'Argens. On le retrouve aussi entre autre en : Espagne, Italie, Algérie, Maroc, Syrie, Turquie, etc. Ce processus impacte fortement la géographie actuelle en permettant malgré les incisions quaternaires la préservation locale de piémonts fini-miocènes datant de 6 Ma notamment dans le SE de la France (Valréas-Valensole-Bas-Dauphiné-Durance). Il contrôle aussi la genèse de niveaux karstiques remontants bien connus dans l'Ardèche, Mocochain et al. (2009). Ce processus affecte aussi localement les séries pré-messiniennes du bassin molassique péri-alpin comme le Rhône à St Désirat qui incise le socle centralien au Messinien suite à la migration vers l'ouest du piémont rhodanien d'âge tortono-messinien. Reste qu'il est parfois difficile de savoir si le tracé épigénique ne résulte pas d'une capture amont de la rivière.

**Mots-Clés:** Epigénie, Messinien, Pliocène, Méditerranée

<sup>\*</sup>Intervenant

## Subduction versus crustal tectonics - impact on southern ecuadorian margin uplift: quantification of uplift rates, modelling of marine terraces, and interseismic coupling pattern

Marianne Saillard <sup>\*ψ1</sup>, Andrea Cisneros <sup>φ2</sup>, Laurence Audin <sup>§2</sup>, Mohamed Chlieh <sup>¶2</sup>

<sup>1</sup> Université Côte d'Azur, IRD, CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur, Géoazur, Valbonne, IRD : UR84 – France

<sup>2</sup> IRD, CNRS, Université Grenoble Alpes, ISTerre, Grenoble, France (IRD) – IRD : UR219 – France

A purely elastic model predicts a null deformation budget over one seismic cycle and then does not contribute to relief building (Savage, 1983; Okada, 1992). The along-strike long-range pattern of permanent coastal uplift we observe in numerous convergent margins contradicts this model, suggesting more complex rheological earth structure models. Several studies suggest a link between the upper plate deformation and frictional properties on the plate interface. In order to better understand this relationship, we have studied 4 sites along the southern Ecuadorian margin (from 0°55' to 3°55'). For these areas, we quantified the permanent deformation by the morpho-tectonic (study of marine terraces) and drainage basins analyses of the coastal deformation. In addition, we tested the modeling of the development of marine terraces by three independent methods to reproduce the actual coastal morphology and quantify uplift rates. Our results are robust and strongly supported by several approaches, from field observations, morpho-tectonic analysis to modeling. We deliver a new and accurate morpho-tectonic map of coastal uplift and active faults, and a pattern of coastal uplift rates along the southern Ecuadorian margin. In contrast to previous studies, we propose that the southern Ecuadorian margin (from 0°55' to 2°42') is uplifting with a quite homogeneous rate (~0,4 mm/a). Variations in the uplift rate are local and suggest the influence of local tectonic activity and/or deep processes related to the subduction zone (e.g., subduction of seamounts, splay faults, local changes in the interplate characteristics, etc). We calculated an equivalent interseismic coupling model from the inversion of uplift rates data for the southern Ecuadorian margin. It shows that 18% of the seismic cycle deformation is converted into permanent deformation. The equivalent interseismic coupling model and the interseismic coupling model calculated from the inversion of GPS data match quite well. The good correlation between the two interseismic coupling models suggests that coastal morphology, and marine terraces in particular, could be used for assessing frictional properties along the plate interface at long-term scales (~ 250 ka). Finally, we evidenced recent and very high uplift rates (~1.4 mm/yr) on Puná Island in the Gulf of Guayaquil uplift rates are anomalously higher compared with the other areas. This island represents an example of levels of marine terraces formed not by the subduction influence but the action of intense tectonic activity. Our analysis shows that the deformation of the island is strongly influenced by an intense tectonic activity along a crustal fault, near the megalopolis of Guayaquil. Our study mark an unknown and peculiar setting of the coastal deformation along the Ecuadorian margin which could have an impact on seismic hazard assessment.

**Mots-Clés:** marine terraces, coastal uplift, modeling, interseismic coupling, morpho, tectonics, subduction zone

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: saillard@geoazur.unice.fr

## Constraining the dynamic rupture process of the 2014 M6.0 Napa Valley, California, earthquake from seismic and geodetic observations

Cedric Twardzik <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> Géoazur (GEOAZUR) – Université Nice Sophia Antipolis – Bât 1, 250 rue Albert Einstein Les Lucioles 1, Sophia Antipolis 06560 VALBONNE, France

Moderate-sized earthquakes can be devastating as proven by the recent earthquakes in central Italy. This is even more critical as the seismic hazard in mainland France is mainly based on moderate-sized earthquakes. Thus, it is essential to gain a better understanding on the mechanisms that control their rupture process. In particular, it is important to get better estimates of the energy budget for these earthquakes. Indeed, it plays an important role on the estimation of the intensity of strong ground motion. This is why, in this study, surface observations (seismic and geodetic) are used to directly constrain the friction law parameters that control the dynamic rupture process of the 2014 M6.0 Napa Valley, California, earthquake. Using a recently developed method from Causse et al. (2017), the parameters of a slip-weakening friction law are distributed on the fault plane using a spline interpolation scheme. Then, an optimisation algorithm is used to search for the optimal distribution of these parameters that can produce a dynamic rupture model capable of explaining the surface observations. During that process, we keep track of important parameters that are part of the energy budget of the rupture such as the fracture energy, the radiated energy, the stress ratio, the seismic moment, and the rupture speed. This is done so that we can explore the suite of models capable of explaining the surface observations.

**Mots-Clés:** Moderate, sized earthquake, dynamic rupture process, strong motion data, geodetic data, energy budget

<sup>\*</sup>Intervenant

## Analogue modeling of the spontaneous formation of a pull-apart basin above a thick viscous evaporitic layer: The case study of El Hamma pull-apart basin, Gabes, Tunisia

Bruno Vendeville <sup>\*1</sup>, Marwa Boussarsar <sup>2</sup>, Chedly Abbes <sup>2</sup>, Fabien Graveleau <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences

<sup>2</sup> Univ. Sfax, Fac. Sciences de Sfax, Laboratoire GéoModèle - LR16ES17, BP 1171 (Laboratoire GéoModèle) – Tunisie

The El Hamma graben system located west of Gabes, Tunisia, represents an extensional relay between two major dextral shear zones trending N110-120: the Hadhifa-Fejej fault corridor in the North, and the OglatMerteba-Matmata fault in the South. This extensional area has a 35km width and a 40km length. Well data show that this basin contains a Mesozoic and Cenozoic sedimentary cover, starting from early Jurassic until Neogene. Yet, the presence of an outcrop of viscous evaporitic triassic salt along Hadhifa-Fejej fault proves the existence of this evaporitic layer below the sedimentary cover, and that these evaporites have been able to rise up through at least 5 km of sedimentary overburden.

We hypothesized that during the tethyan rifting and Cretaceous transtension phase, two salt ridges formed by reactive diapirism along the two main fault corridors well before shortening began. The pull-apart basin initiated first during the Cretaceous transtensional phase. The NW-SE Tortonian-to Present shortening phase reactivated these ridges as dextral transpressional strike-slip zones, leading to the reactivation of the El Hamma pull-apart basin.

Using analogue models made of dry sand and viscous silicone polymer, we tested the possibility of generating a pull-apart basin above a thick viscous layer and between two pre-compression viscous ridges that were offset across strike, and overlapping along strike. This model did not require the use of any basal discontinuity. Indeed, results from our experiments prove that the interaction between the two salt ridges in a transpressional regime makes it possible for a pull-apart basin to form spontaneously within the relay zone between these pre-existing ridges.

**Mots-Clés:** Salt Tectonics, Central Tunisia, pull, apart basin, analogue modeling

\*Intervenant

## **13.2. Cartographie et modélisation de la surface // Géologie urbaine // Karstologie, outils, processus et marqueurs paléogéographiques // La place du karst dans la zone critique : ses spécificités depuis les outils d'observation jusqu'à la modélisation**

## Évolution géomorphologique et environnementale de la Côte Cantabrique durant les MIS 6-4 : la Grotte de Cobieru (NO d'Espagne)

Daniel Ballesteros <sup>\*1</sup>, Laura Rodríguez-Rodríguez, Saúl González-Lemos, Santiago Giralt , Diego álvarez-Lao , Luna Adrados , Montserrat Jiménez-Sánchez

<sup>1</sup> IDEES – Normandie Univ, UNIROUEN, CNRS : UMR6266 – France

La Côte Cantabrique située au Nord de la Péninsule Ibérique est dominée par des terrasses marines pliocènes-quaternaires et des falaises interrompues par des baies sablonneuses et des estuaires confinés. Durant le Dernière Période Glaciaire, cette côte a représenté un "corridor naturel" pour les migrations de la faune glaciaire et des hominidés européens, dont les restes et l'art rupestre sont conservés dans des grottes côtières déclarées Patrimoine Mondial. L'objectif de ce travail est d'établir dans cette perspective la géomorphologie et l'environnement de la Côte Cantabrique karstique des Asturias sur la base de la géomorphologie de la Grotte de Cobieru et de trois datations 234U/230Th par spectrométrie alpha. Cette grotte inclut des sédiments *silicoclastiques* provenant des cônes torrentiels situés sur la terrasse marine inférieure calcaire (10-40 m d'élévation), où la grotte s'est développée. Ces cônes sont le résultat de l'érosion de la terrasse marine supérieure quartzoarénitique située à 150 m d'altitude. Les datations radiométriques fournissent les âges de référence de trois épisodes de sédimentation terrigène superficielle et souterraine: un premier épisode de > 350 ka coïncidant avec le développement des forêts tempérées décidues, lié à la présence du gastéropode *Elona quimperiana*; un deuxième épisode à 145 ka (MIS 6); et un troisième épisode à 65 ka (MIS 4) avec un paysage ouvert qui implique un habitat particulier mis en évidence par la découverte d'une molaire du cheval archaïque *Equus ferus*. Ces deux derniers épisodes ont coïncidé avec des conditions froides et le bas niveau global de la mer, quand la ligne de côte a migré vers le Nord et que le "corridor naturel" côtier était environ 2-5 km plus large que celui d'aujourd'hui. Après 65 ka, les cônes torrentiels ont été érodés et le karst a émergé, permettant ainsi que la faune glaciaire tombe dans les gouffres pour être préservée et que les humains occupent et peignent certaines des célèbres grottes de la Côte Cantabrique des Asturias.

**Mots-Clés:** karst, geomorphologie, paléoenvironnement, niveau de la mer

\*Intervenant

## Cartographie prédictive des formations de surface : modélisation 3D et applications pratiques

Anne Bialkowski <sup>\*1</sup>, Bruno Tourlière <sup>1</sup>, Frédéric Lacquement <sup>1</sup>, Hélène Tissoux <sup>1</sup>, Frédéric Chène <sup>1</sup>,  
Julien Bernard <sup>1</sup>, Denis Thiéblemont <sup>1</sup>, Hugues Bauer <sup>1</sup>, Bernard Bourgine <sup>1</sup>,  
Caroline Ricordel-Prognon <sup>1</sup>, Robert Wyns <sup>1</sup>, Alexandre Brugeron <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) – France

70 % du territoire métropolitain est couvert par les formations superficielles ou formations du "Régolithe" mais seulement 40 % sont cartographiées et 10 % possèdent une information décrivant leur épaisseur (données obtenues par modélisation) ou leurs propriétés physico-chimiques (BRGM, Rapport d'activité 2017). Pourtant, elles font l'objet d'un intérêt croissant, non seulement en termes de connaissance géologique (cartographie, lithologie, processus de formation, propriétés physico-chimiques) de la proche-surface (0-200 m), mais aussi en termes de réponses aux problématiques et aux enjeux des territoires présentant un intérêt économique et sociétale (usages du sous-sol, ville durable, gestion des ressources et des risques).

Depuis 10 ans le BRGM travaille sur l'acquisition des connaissances sur la proche-surface : l'état des lieux publié en 2013 à l'échelle 1: 1 000 000 représente à la fois les dépôts allochtones (issus de processus de transport) et les dépôts autochtones (issus essentiellement de processus d'altération). Ce travail a mis en évidence une forte hétérogénéité dans la qualité de l'information géologique disponible en cartographie d'où la nécessité d'acquérir des connaissances, directe, sur le terrain, ou indirecte, méthodes de géophysique ou de cartographie prédictive.

A partir des données de forages de la Banque de Données du Sous-sol du BRGM (<http://infoterre.brgm.fr/>) et d'une méthodologie de contrôle de cohérence des données, la modélisation géométrique des formations meubles de surface permet de réaliser des cartes prédictives de la distribution spatiale et de l'épaisseur des dépôts de surface, à l'échelle de plusieurs départements (1/50 000) et pour une maille de 200 x 200 m. Ces résultats permettent de compléter les cartes existantes, en particulier dans les zones où les points d'observations sont rares, complexifiant les interprétations des géologues.

Les résultats obtenus sur le socle armoricain (région Bretagne) sont exploités dans le cadre de la qualification des entités hydrogéologiques de socle de la BDLISA, référence en France (<https://bdlisa.eaufrance.fr>). Les contours des altérites de socle des cartes géologiques traditionnelles ont été complétés par les polygones issus de la modélisation géométrique. Pour chaque surface cartographiée, la nature lithologique des altérites a été précisée.

Pour développer des supports de connaissances répondant aux besoins sociétaux, un état des lieux de la connaissance lithologique a été entrepris, depuis la région Bretagne vers le reste de la métropole, pour produire de nouvelles cartes lithologiques, à partir des cartes géologiques harmonisées à 1/ 50 000. Ces cartes sont indépendantes du découpage administratif et s'attachent à produire une information pratique et simplifiée des dépôts rencontrés, à destination des usagers, professionnels et décideurs.

**Mots-Clés:** modélisation 3D, cartographie prédictive, formations superficielles, lithologie, Bretagne

Intervenant

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: a.bialkowski@brgm.fr

## La corrosion biogénique causée par les chauves-souris dans la grotte de Drotsky (Gewihaba Hills, NW Botswana) : implications géomorphologiques et géoarchéologiques

Grégory Dandurand <sup>\*1,2</sup>, Francis Duranthon <sup>3,4</sup>, Marc Jarry <sup>5,2</sup>, Dominic Stratford <sup>6</sup>,  
Laurent Bruxelles <sup>7,8</sup>

<sup>1</sup> Institut National de Recherches Archéologiques Preventives (INRAP) - France

<sup>2</sup> Travaux et recherches archéologiques sur les cultures, les espaces et les sociétés (TRACES) - Université Toulouse 2,  
Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5608 - France

<sup>3</sup> Muséum de Toulouse - Toulouse Métropole - France

<sup>4</sup> AMIS - Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS : UMR5288 - France

<sup>5</sup> Institut National de Recherches Archéologiques Préventives (St-Orens) - Ministère de la Culture et de la  
Communication, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique - France

<sup>6</sup> Université du Witwatersrand (Johannesburg) - Afrique du Sud

<sup>7</sup> Inrap - INRAP - France

<sup>8</sup> Institut Français d'Afrique du Sud (IFAS) - Afrique du Sud

Située au nord-ouest du Botswana, la grotte de Drotsky est une vaste cavité connue pour la mise au jour de niveaux archéologiques datés du Late Stone Age. Elle abrite une colonie de chauves-souris de plusieurs centaines de milliers d'individus à l'origine d'un puissant dépôt de guano sur lequel on progresse dans certaines parties profondes de la cavité.

L'étude détaillée des morphologies de parois et de plafond a permis de mettre en évidence qu'une partie de la spéléogenèse est due à la bio-corrosion. Ce type de processus d'altération et de corrosion est encore peu décrit en milieu souterrain. Pourtant, il est maintenant bien admis que le rôle joué par les chauves-souris et leurs déjections sur l'état des parois, leur altération et l'expansion des galeries et salles par condensation-corrosion est un processus à prendre en compte dans l'évolution des réseaux profonds. Dans le cas de la grotte de Drotsky, les mécanismes de cette bio-corrosion, leurs impacts morphogéniques (dissolution et recul de parois, formation d'encoches, d'encorbellements, de coupoles de voûte...) et leurs conséquences sur l'expansion des conduits sont discutés.

Les conséquences de cette bio-corrosion débouchent également sur des problématiques archéologiques en termes de taphonomie et de conservation d'art pariétal. Bien que plusieurs vestiges aient été mis au jour témoignant d'une occupation ancienne depuis le MSA, aucun indice d'art pariétal (gravures, dessins...) n'a été découvert. Cette absence ne signifie pas nécessairement que les premiers occupants n'ont pas laissé de traces sur les parois de la cavité, mais que potentiellement ces traces auraient bien pu disparaître sous l'effet d'une fréquentation massive de chauves-souris durant plusieurs millénaires. Cette occupation aurait favorisé une altération, une corrosion et une dissolution accélérées des parois, contribuant potentiellement à la disparition totale ou partielle de toute trace d'action anthropique sur l'encaissant. Au-delà de cette grotte, la mise en évidence de tels phénomènes oblige à réinterpréter l'absence de traces pariétales du passé dans les cavités occupées à ces périodes.

**Mots-Clés:** Bio, geomorphologie, Chauve, souris, Conservation, Art pariétal

<sup>\*</sup>Intervenant

## Le remplissage sédimentaire des plaines alluviales : un levier pour la restauration de la Loire et de ses affluents

Benoit Deleplancque <sup>\*ψ1</sup>, Théo Bulteau <sup>1</sup>, Aurélien Lacoste <sup>2</sup>, Stéphane Rodrigues <sup>1</sup>

<sup>1</sup> UMR CITERES – Université de Tours, Université de Tours – France

<sup>2</sup> GéoHydroSystèmes COntinentaux (GéhCO EA6293) – Université de Tours – France

Au sein des systèmes fluviatiles actuels la continuité sédimentaire constitue un préalable nécessaire à la restauration écologique. La charge sédimentaire mobilisable est principalement alimentée par les apports amont et les stocks disponibles au sein des vallées principales et affluentes. Sur le bassin de la Loire, la faible production amont suspectée amène à s'interroger sur la potentialité que représente les formations fluviatiles récentes (lits mineurs et majeurs) et anciennes (terrasses). Ces dépôts, en fonction de leur granularité et de leur degré de con-finement par rapport aux chenaux actuels, peuvent fournir un stock de sédiments utile au bon équilibre du géosystème dans l'optique de la gestion sédimentaire et écologique raisonnée de ce dernier. L'étude des stocks disponibles en fond de vallée repose sur l'analyse de l'étagement et l'emboîtement des formations alluviales présentes. Cette étude lorsqu'elle est menée à grande échelle est principalement basée sur l'analyse de sondages/forages ; elle s'avère chronophage et lourde en termes de moyens humains. Dans ce contexte, les géostatistiques appliquées aux remplissages sédimentaires de fond de vallée (Donsimoni & al., 2008 ; Deleplancque, B. 2016) permettent la reconstruction de la géométrie de la vallée avant son remplissage alluvionnaire et l'estimation de l'épaisseur des alluvions. Cette méthodologie a été appliquée à un jeu de données créé à partir d'une source d'information de la Banque du Sous-Sol du BRGM sur différents affluents actuels de la Loire. L'estimation de cette interface entre le substrat et les alluvions s'avère utile pour évaluer les volumes de sédiments potentiellement remobilisables présents dans les fonds de vallée qui pourront guider les travaux de restauration du fleuve dans l'avenir (espace de divagation, recharge granulométrique, réouverture de chenaux, élargissement du cours endigué). Cette étude s'intègre dans le cadre du projet de recherche COntinuités Sédimentaires de ses Affluents et de la Loire (COSAL).

**Mots-Clés:** remplissage sédimentaire, estimation géostatistique, Loire

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: benoit.deleplancque@univ-tours.fr

## Approche méthodologique pour la conception et la mise en place d'une surveillance des cavités souterraines d'origine anthropique

Christian Franck <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Christian Bouffier <sup>1</sup>, Emmanuelle Klein <sup>1</sup>, Stella Coccia <sup>1</sup>, Jean-Marc Watelet

<sup>1</sup> Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS) -- France

Le risque d'instabilité des cavités souterraines d'origine anthropique concerne un territoire étendu et des dizaines de milliers de communes en France. S'il existe des solutions de traitement pérennes, comme le comblement des vides, la surveillance des cavités souterraines peut constituer un outil palliatif et transitoire de gestion du risque.

L'approche méthodologique de conception et de mise en place d'un dispositif de surveillance se décline de la manière suivante.

Dans un premier temps, le phénomène d'instabilité redouté doit être connu et correctement évalué : durée et urgence de la surveillance, possibilités et conditions d'accès aux sites, contraintes de sécurité, conditions de transmission...

Dans un deuxième temps, la méthode de surveillance la plus adaptée au site est choisie. Les inspections visuelles sont fondamentales et à privilégier dès lors que l'on peut accéder au site dans des conditions de sécurité acceptables. Elles peuvent s'appuyer sur des dispositifs tels que la photogrammétrie ou les scanners laser. Les mesures géotechniques permettent, quant à elles, d'évaluer directement des caractéristiques physiques ponctuelles telles que des déplacements, des pressions, ou des niveaux d'eau. Enfin, les capteurs géophysiques permettent une surveillance sur de grandes étendues, grâce à des observations indirectes liées à l'évolution et à l'instabilité des massifs ou des vides souterrains.

Dans un troisième temps, la surveillance doit être testée afin de s'assurer de sa fonctionnalité, et que l'ensemble des maillons qui la constituent est maîtrisé : appareils de mesures, processus de communication des données, de maintenance et d'organisation. Elle doit s'appuyer sur des seuils d'alarme fiables caractérisant une évolution préjudiciable de l'instabilité, afin d'alerter les maîtres d'ouvrage ou les collectivités uniquement en cas de besoin. La gestion des données de surveillance doit par ailleurs permettre de détecter un dysfonctionnement. Enfin, le partage et la restitution des données optimisés permettent de procéder à des analyses plus rapides tenant compte des retours d'expérience.

**Mots-Clés:** cavités souterraines, mouvements de terrain, surveillance, géotechnique, géophysique

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>✉</sup>Auteur correspondant: christian.franck@ineris.fr

## Présentation des cartes G

Isabelle Gabelotaud <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) – Ministère de la Défense – 13 rue du Chatellier 29200 BREST, France

La carte G représente la nature des fonds sur un fond de carte marine. Publiées pour la plupart à une échelle proche du 1/50 000, elles sont autant que possible réalisées dans le cadre de collaborations avec les laboratoires universitaires ayant la connaissance de la zone à cartographier. La réalisation d'une carte G repose sur l'utilisation et la compilation de toutes les données disponibles sur la nature des fonds. Le sédimentologue en charge de sa réalisation utilisera aussi bien les observations anciennes au plomb suiffé (95% des prélèvements sur le plateau continental français), que les prélèvements, les carottages, le système de classification des fonds, les données d'imagerie SMF et le sonar latéral, les photographies aériennes, les levés lidar. Actuellement les sédiments sont figurés par différentes trames vertes avec pour objectif à court terme le passage des cartes G en couleurs.

En 1897, le Service Hydrographique français a publié la première carte mondiale de sédimentologie. La reprise de cette activité en 1992 a permis la publication d'un catalogue de 40 cartes G fin 2017 et l'objectif d'une couverture totale des côtes métropolitaines pour 2024.

**Mots-Clés:** Cartographie, Répartition des sédiments, côtes de France

<sup>\*</sup>Intervenant

## Évolution géomorphologique fini-pléistocène du Cerro Benitez et spéléogenèse de la Grotte du Mylodon (Ultima Esperanza, Chili)

Igor Girault <sup>\*ψ1</sup>, Dominique Todisco <sup>1</sup>, Carole Nehme <sup>1</sup>, Joël Rodet <sup>2</sup>, Attila Ciner <sup>3</sup>, Mehmet Akif Sarikaya <sup>3</sup>, Cengiz Yıldırım <sup>3</sup>, Fabiana Martin <sup>4</sup>, Luis Borrero <sup>5</sup>, Damase Mouralis <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Identités et Différenciations des Espaces, de l'Environnement et des Sociétés, Université de Rouen, CNRS : UMR6266 – France

<sup>2</sup> Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C) – Université de Rouen Normandie : UMR6143 -Fr

<sup>3</sup> Eurasia Institute of Earth Sciences (EIES) – Turquie

<sup>4</sup> Centro de Estudios del Hombre Austral, Instituto de la Patagonia – Chili

<sup>5</sup> Departamento de Investigaciones Prehistóricas y Arqueológicas, Universidad de Buenos Aires - Argentine

Les grottes et abris-sous-roches du Cerro Benitez (Ultima Esperanza, Chili), dont la célèbre Grotte du Mylodon, ont livré des restes de mégafaune éteinte (paresseux, chevaux, grands félins) et des traces d'occupation paléo-indienne datés de la transition Pléistocène-Holocène (d'environ 16 000 à 8 000 ans B.P.). Bien que primordial pour comprendre la formation du registre fossile, le contexte géoarchéologique des sites reste peu documenté. L'origine des cavités a fait l'objet de plusieurs plusieurs hypothèses : tafonisation, érosion lacustre pro-glaciaire, ou encore léchage répété des parois par la mégafaune. Cependant, aucune ne s'appuie sur des preuves tangibles. Nous proposons ici une hypothèse alternative basée sur des observations de terrain réalisées entre novembre 2017 et mars 2018. À cette occasion, une typologie des formes d'érosion a été réalisée à trois échelles pour le versant sud du Cerro Benitez : micro-formes ( $\lambda < 1$  m), méso-formes ( $1 \text{ m} < \lambda < 100$  m) et macro-formes ( $\lambda > 1$  m). L'analyse des relations d'emboîtement et de recouplement des formes permet de reconstituer une évolution géomorphologique du Cerro Benitez en quatre actes : (1) abrasion des reliefs pré-existants durant la phase d'avancée du lobe glaciaire ; (2) début de la fonte du glacier au sommet du Cerro Benitez. L'eau de fonte sous-glaciaire sculpte un paysage labyrinthique composé d'un réseau de chenaux, de piscines de cascades et de roches-champignons qui se surimpose aux roches moutonnées résiduels de la phase précédente. Certaines marques de courant sous-glaciaire hyper-développées forment des cavités ; (3) résidualisation du glacier et formation de petits cirques glaciaires qui recoupent parfois le réseau de chenaux préexistant. L'eau de fonte sous-glaciaire surcreuse les parois du substrat rocheux là où la lithologie le permet sous forme de marques de courant. Dans la partie amont des cirques, les grottes sont ouvertes par dissolution des unités géologiques carbonatées et cryoclastie au contact du glacier. La présence de paragenèses suggère la pénétration de langues glaciaires à l'intérieur de la cavité ; (4) fonte totale des glaciers sur le Cerro Benitez, mise en place de conditions climatiques périglaciaires et occupation des cavités par l'Homme et la mégafaune.

Des échantillonnages ont été effectués pour réaliser des datations Be10 de blocs erratiques et des datations U/Th de stalagmites afin de contraindre temporellement le retrait des glaciers du Cerro Benitez et l'ouverture des grottes.

**Mots-Clés:** Géomorphologie, Pléistocène, Spéléogenèse, Glaciation, Quaternaire, Géoarchéologie, Patagonie, Chili

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: igor.girault@univ-rouen.fr

## The landsat 7 ETM+ remote sensing imagery for lithological and structural mapping in the central Côte d'Ivoire (West Africa): case of Dabakala area

Allou Gnanzou <sup>\*1</sup>, Gbele Ouattara <sup>2</sup>, Yacouba Coulibaly <sup>1</sup>, Bernard Bonin <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Géologie du Socle et Métallogénie, UFR STRM, Université Félix HOUPHOUET- BOIGNY Abidjan, Côte d'Ivoire (UFHB) – Côte d'Ivoire

<sup>2</sup> Département de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi), INP-HB, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire – Côte d'Ivoire

<sup>3</sup> Laboratoire GEOPS, Université Paris-Saclay – Université Paris XI - Paris Sud – France

The control of different faults networks is a capital tool, due to the fact that any fault zone is dependent on the possibility of concentration of useful minerals such as gold. Also, it is clear that most of the identified faults date for most long time and it is imperative to update structural maps.

From remote sensing from Landsat 7 ETM+ of Dabakala area (Central Côte d'Ivoire), we extracted lineaments from an analogical analysis supplemented by numerical analyzes using directional filters and textures. Subsequently, we determined the limits of the lithological units from their textures and colors. All new faults obtained were incorporated into the existing ones. The assimilation of some lineaments fractures and faults was made on the basis of pre-existing map data and field observations. A sketch lithostructural map was also obtained.

Regarding lithological distinctions, eleven optically distinct zones, categorized into three main provinces, have been identified. Several major faults directions were mapped. These are the mostly N-S to NNE-SSW with sinistral, dextral N90° to N100° direction and dextral or sinistral NW-SE to NNW-SSE direction.

A significant structure appears on the Landsat ETM+ colored composition of ACPs Band Ratios 5-7/3-5/3-2. This is the Sarala fault (FSr), with N075° to N080° direction, which is identified for the first time. Other structures appear on the processed images should be checked in the field.

**Mots-Clés:** landsat ETM+, analogical and digital analysis, lithostructural map, Dabakala, Côte d'Ivoire

\*Intervenant

## Modélisation structurale 3-D de l'anticinal-faillé du Mélantois, S-E de la métropole de Lille

Fabien Graveleau <sup>\*1</sup>, Joris Mavel <sup>2</sup>, Francis Meilliez <sup>1,3</sup>, Olivier Averbuch <sup>1</sup>, Yassir Amraoui <sup>4</sup>,  
Abdelkarim Gherbi <sup>1</sup>, Salah Ouaichouche <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – Université de Lille, CNRS : UMR8187, Université du Littoral Côte d'Opale – France

<sup>2</sup> Sciences Environnement – Bureau d'Etude en Environnement – France

<sup>3</sup> Société Géologique du Nord (SGN) – Université de Lille – France

<sup>4</sup> Fondasol Toulouse – Bureau d'études Géotechniques et Géophysiques – France

La structure du "Dôme du Mélantois" est un anticinal E-W à fort rayon de courbure situé au SE de la métropole de Lille. Né de la réactivation tertiaire de failles profondes enracinées dans le socle varisque, il fait affleurer la craie du Sénonien de part et d'autre des bassins tertiaires de Flandres au Nord et d'Orchies au Sud. Les rares possibilités d'observation de cette structure en surface et subsurface montrent qu'il est parcouru par de nombreuses failles à rejet décimétrique à pluri-métriques ; la principale étant la faille de Haubourdin, orientée E-W et localisée en charnière du pli. Etant donné que la craie constitue le principal réservoir aquifère de la métropole lilloise, mieux comprendre la géométrie de cette structure, ses drains majeurs, et *in-fine* son hydrodynamique, est un enjeu majeur pour ce territoire très densément peuplé.

L'objectif de cette étude était donc de revisiter la structure de l'anticinal du Mélantois en se basant sur un maximum de données de sondages. Pour cela, les données utilisées ont été extraites de la Banque de données du sous-sol (BSS) sur le portail Info-Terre du BRGM et recueillies auprès de divers partenaires territoriaux (CEREMA, MEL, etc.). Au total, sur les 2000 sondages analysés, 413 ont été retenus et importés dans le logiciel de modélisation structurale Move ®. Ces sondages retenus sont suffisamment profonds pour atteindre l'interface du Turonien moyen/inférieur (Marnes, régionalement appelées "Dièves") et du Turonien supérieur / Sénonien (Craie), considérée comme suffisamment contrastée pour servir de marqueur stratigraphique local et ainsi imager la structure du pli.

Bien que préliminaires, nos résultats montrent que l'exploitation brute des sondages géologiques est un exercice délicat et en partie subjectif. En effet, de nombreuses incohérences locales visibles en 3-D attestent que des interprétations erronées des sondeurs peuvent impacter fortement la réflexion sur la structure. Une nécessaire ré-analyse de chacun des sondages a permis de corriger certaines interprétations et d'aboutir à une logique structurale plus acceptable. Ainsi, notre étude a permis de proposer une nouvelle interprétation structurale du Mélantois que nous avons comparée aux différentes versions publiées par le passé. Ceci concourt à mettre à jour notre vision du bâti géologique du SE de la métropole lilloise et ainsi permettre une meilleure compréhension hydrogéologique de l'aquifère de la craie.

**Mots-Clés:** Anticinal du Mélantois, Modélisation structurale, Faille, Pli

\*Intervenant

## Utilisation de la méthode déterministe basée sur un GIS pour la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain : cas de la région de Djebahia, Algérie

Nassim Hallal <sup>\*ψ1</sup>, Abdelkrim Yelles-Chaouche <sup>1</sup>, Yahia Mohammedi <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique (CRAAG) - Algérie

Depuis des années, les mouvements gravitaires sont considérés comme une problématique qui occupe une place importante dans l'esprit des citoyens et les responsables de la région de Djebahia (Bouira, Algérie). Ces mouvements ont affecté les réseaux routiers, des conduites de transfert d'eau et dernièrement et suite aux fortes pluies ces mouvements ont touché des zones urbaines. Par le développement considérable des programmes informatiques et de l'outil GIS, la réalisation d'opérations d'analyse très complexes pour cartographie et trouver des solutions de préventions adéquates à ces phénomènes sont possibles. Actuellement, plusieurs approches existent pour la cartographie de la susceptibilité aux mouvements gravitaires mais les plus utilisées dans ce domaine sont les deux méthodes probabiliste et déterministe. Dans cette étude, l'approche déterministe et l'outil GIS sont utilisées pour l'élaboration de la carte de susceptibilité aux glissements de terrain dans cette région. Cette dernière est caractérisée par des terrains miocènes qui sont exposés aux différents aléas naturels dont les plus importants sont les glissements de terrain. Ils constituent une famille très diversifiée qui témoigne de l'évolution morphologique des différents versants dans la région. La méthodologie adoptée dans cette étude est basée sur une analyse des caractéristiques géotechniques des formations miocènes à partir de la base de données géotechniques existantes et la vérification de la stabilité des versants par le logiciel Talren 4. Ce dernier est utilisé pour la définition des surfaces de rupture et le calcul des facteurs de sécurité en fonction de la pente et afin de déterminer les différentes classes susceptibles au glissement de terrain. A l'aide de l'outil GIS et à partir des résultats obtenus, une carte de susceptibilité aux glissements de terrain sera définir pour la région d'étude.

**Mots-Clés:** Glissements de terrain. Analyse. GIS. Cartographie. Susceptibilité.

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: nhallal@usthb.dz

## Construction d'un modèle géologique des réservoirs karstiques profonds du Bassin de Thau (sud de la France) : un outil innovant pour la gestion de la ressource en eau

Romain Hemelsdael <sup>\*ψ1</sup>, Michel Séranne <sup>1</sup>, Claudine Lamotte <sup>2</sup>, Adnand Bitri <sup>3</sup>, François Bretaudeau <sup>3</sup>, Séverine Carigt <sup>3</sup>, Nicolas Coppo <sup>3</sup>, Grabriel Courrioux <sup>3</sup>, Mathieu Darnet <sup>3</sup>, Eglantine Husson <sup>3</sup>, Thomas Jacob <sup>3</sup>, Bernard Ladouche <sup>4</sup>, Elizabeth Legoff <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Géosciences-Montpellier (GM) - CNRS, Université de Montpellier - France

<sup>2</sup> BRGM Montpellier - Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

<sup>3</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) (BRGM) - - - France

<sup>4</sup> NRE, BRGM, Univ. Montpellier - Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Univ. Montpellier - Fr

Les massifs carbonatés karstifiés du Jurassique abritent l'une des principales ressources en eau souterraine en Languedoc. Le projet DEM'EAUX THAU a pour objectif de développer un outil d'aide à la gestion de la ressource en eau souterraine basé sur la caractérisation géologique et hydrologique des karsts profonds près de la lagune de Thau (SW de Montpellier). Au delà des questions sociétales posées par les enjeux d'approvisionnement d'une population croissante, de conflits d'usage, de vulnérabilité ou encore de salinisation, réservoirs karstiques profonds sont mal documentés et les questions scientifiques sont multiples. La karstification des massifs carbonatés dépend des variations du niveau de base, causées par les surrections de l'Isthme Durancien (Albien), la compression pyrénéenne (Eocène) ou par la crise messinienne. Ces événements ont induit l'altération des massifs, accompagnée localement de dépôts de séries résiduelles (bauxites d'âge Albien notamment). De plus, le thermalisme de la zone, suggère des processus de karstification hypogène qui demandent à être précisés. En terme de circulation des eaux, quel est le rôle des failles, des dissolutions/minéralisations, et des sédiments colmatant les karsts? Dans la zone d'étude où convergent des eaux météoriques, thermales, marines et saumâtres, quelles sont les interactions possibles entre les réservoirs karstiques profonds et superficiels ? Le projet DEM'EAUX THAU propose de construire un modèle géologique 3D (GeoModeller) des réservoirs karstiques. Le modèle intègre les données géologiques de surface, les forages, la sismique réflexion, ainsi que de nouvelles données électromagnétiques et gravimétriques acquises dans le cadre du projet. Les données électromagnétiques permettent de cartographier la résistivité apparente jusqu'à 1000 m de profondeur et montrent des anomalies résistantes et conductrices potentiellement liées à la présence de massifs carbonatés et de fluides géothermaux, respectivement. La nouvelle acquisition gravimétrique clarifie le schéma structural, met en évidence des failles masquées, ainsi que le remplissage post-messinien. L'inversion gravimétrique du modèle et la comparaison avec l'anomalie résiduelle observée permettra éventuellement de reconnaître les karsts profonds. Enfin, un forage profond équipé (fin 2019) constituera une plateforme de suivi des paramètres hydrologiques des réservoirs, pour élaborer un outil de gestion optimisé de la ressource en eau.

**Mots-Clés:** Modèle géologique, réservoirs karstiques, karsts profonds, couverture, bauxites, Bassin de Thau

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: roman.hemelsdael@gm.univ-montp2.fr

## Cartographie morpho-karstique du Causse Méjean : nouveaux apports sur la connaissance géologique et hydrogéologique

Eglantine Husson <sup>\*1</sup>, Hubert Camus <sup>2</sup>, Vincent Bailly-Comte <sup>3</sup>, Yannick Manche <sup>4</sup>, Alain Jacquet <sup>5</sup>,  
Elisabeth Le Goff <sup>3</sup>, Claudine Lamotte <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) (BRGM) – BRGM – France

<sup>2</sup> CENOTE (CENOTE) – Auteur indépendant – France

<sup>3</sup> BRGM Montpellier (BRGM) – Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

<sup>4</sup> Parc National des Cévennes (PNC) – Ministère de la Culture et de la Communication – France

<sup>5</sup> Lycée Peytavin, Mende (Lycée Peytavin) – Ministère de l'Education Nationale – France

Dans un contexte où la pression augmente sur les ressources en eau, le BRGM et le Parc National des Cévennes se sont associés pour améliorer les connaissances hydrogéologiques du Causse Méjean (Lozère, Sud de la France). Le Causse Méjean est constitué de formations jurassiques carbonatées visibles sur toute la hauteur de la pile sédimentaire grâce à l'incision des cours d'eau qui l'entourent : le Tarn au Nord et à l'Ouest, la Jonte au Sud et le Tarnon à l'Est. Si la structure et la sédimentologie de l'entablement carbonaté du Causse sont assez bien documentées (notamment par les cartes géologiques du BRGM au 1 : 50 000), il est plus difficile de comprendre l'évolution post-dépôt qu'a subi le Causse. Or cette évolution est à l'origine de sa structuration karstique et de la problématique actuelle qui est de mieux comprendre l'extension et le fonctionnement de ces systèmes karstiques.

A cette fin, une tâche spécifique a été dédiée à l'étude morpho-karstique du Causse, afin de reconstituer l'évolution post-dépôt du Causse Méjean, et notamment du rôle des couvertures sédimentaires sur les étapes de la karstification. Cette étude a permis de mieux contraindre les bassins d'alimentation et mieux comprendre l'organisation actuelle du réservoir karstique.

Ainsi, la cartographie des formations superficielles et des formes morpho-karstiques à la surface du Causse ont permis de mettre en évidence :

- Une longue altération continentale sous couverture sédimentaire au cours du Crétacé lors de l'épisode des bauxites (crétacé inférieur) et suite aux transgressions au Crétacé supérieur. L'altération intense qui régnait à cette période a pénétré profondément le massif carbonaté, pré-structurant le réservoir karstique ;

- La mise en place des premiers réseaux hydrographiques sur la couverture sédimentaire et son érosion partielle au cours de l'orogenèse pyrénéenne (Eocène) ;

- Le développement de poljes de contact sur la bordure Est (en bordure du massif des Cévennes) avec la mise en place de structures de drainage souterrain vers l'Ouest et l'amorce du soutirage de la couverture résiduelle au sein du karst ;

- L'incision diachrone des cours d'eau avec en premier l'incision du Tarn (Miocène supérieur) à l'origine de la capture progressive des écoulements vers le Nord et de la formation des premiers réseaux étages ; puis de la Jonte et du Tarnon (Néogène).

Les autres tâches du projet, et notamment celles relatives aux traçages artificiels et naturels (hydrochimie) confirment les nouvelles propositions d'extension des bassins d'alimentation des sources suite à ce diagnostic morpho-karstique.

**Mots-Clés:** karst, cryptoaltération, formations superficielles, géomorphologie, hydrogéologie

## Prévision des débits de la rivière Cèze par réseaux de neurones : évolution de la complexité du modèle le long de la traversée du plateau karstique de Méjannes-le-Clap

Anne Johannet <sup>\*ψ1</sup>, Thomas Darras <sup>2</sup>, Séverin Pistre <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Génie de l'Environnement Industriel (LGEI, IMT Mines Alès, Univ Montpellier, France) - France

<sup>2</sup> LGEI, IMT Mines Alès, Univ Montpellier, France - IMT Mines Alès - France

<sup>3</sup> Laboratoire Hydrosciences-Montpellier, Univ Montpellier, France (HSM) - Université Montpellier - France

La connaissance des ressources hydrologiques est indispensable pour la gestion durable des cours d'eau et des aquifères associés. En particulier pour les aquifères karstiques, souvent source unique en eau potable d'un territoire considéré, des études montrent que la ressource en eau est souvent sous-exploitée du fait notamment de la difficulté à en évaluer la quantité stockée. Dans les vastes zones karstiques sous climat méditerranéen, une telle ressource souterraine nécessite d'être mieux connue du fait de son intérêt stratégique, en particulier pour l'eau potable. Le site d'étude de la Cèze est un exemple de la complexité d'un aquifère karstique soumis à des impacts anthropiques importants et qui doit faire face à des problèmes de gestion de l'eau qui concernent : (i) manque d'eau en situation d'étiage entraînant des conflits d'usages, (ii) manque de cohérence entre les politiques territoriales de développement et le déficit en eau, (iii) manque d'informations pour satisfaire les prélèvements (AEP et irrigation), débits réservés pour la baignade et débits minimum biologiques. Ce site est également complexe du point de vue géologique et climatologique. Le bassin de la Cèze, d'une surface de 1360 km<sup>2</sup> comporte des amonts dits "cévenols", de roches magmatiques et métamorphiques avec des pentes très élevées. En partie médiane, on trouve des plateaux calcaires du crétacé (Trias et Jurassique) karstifiés, en particulier le plateau de Méjannes-le-Clap, qui est la zone d'étude de ce travail. Les précipitations sont importantes durant l'automne et montrent un gradient orographique favorisant l'apparition de crues rapides parfois catastrophiques, tandis que les étés sont sujets à des périodes de sécheresse assez longues. Compte tenu de ces difficultés et de l'importance de la ressource en eau karstique pour les milieux aquatiques, un travail de modélisation du débit de la Cèze le long de la traversée du plateau de Méjannes-le-Clap a été entrepris, grâce aux réseaux de neurones formels, dans un projet financé par l'Agence de l'eau RMC dans le cadre de la ZABR. Cette communication présentera comment la complexité du modèle doit être adaptée au fur et à mesure de la descente de la Cèze afin de s'adapter à la complexité et à la multiplicité croissante des processus hydrologiques.

**Mots-Clés:** Karst, prévision, zone critique, réseaux de neurones

Intervenant

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: anne.johannet@mines-ales.fr

## Modélisation par imagerie lidar en vue d'une analyse structurale d'une cavité karstique : exemple de la Salle du Dôme, Grottes de Han-sur-Lesse, Belgique

Elise Kazmierczak <sup>\*ψ1</sup>, Stéphane Jaillet <sup>2</sup>, Sophie Verheyden <sup>3</sup>, Sara Vandycke <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Glaciologie, Université Libre de Bruxelles – Belgique

<sup>2</sup> Laboratoire EDYTEM (UMR 5204) – Université de Savoie, CNRS : UMR5204 – Pole Montagne, Campus scientifique, 73376 Le Bourget du Lac, France

<sup>3</sup> Department of Earth History of Life, Royal Institute of Natural Sciences (RBINS), Brussels – Belgique

<sup>4</sup> Université de Mons (UMons) – 20, place du Parc, B7000 Mons, Belgique

Située dans le domaine karstique des grottes de Han-sur-Lesse en Ardenne belge, la Salle du Dôme est la plus grande cavité connue en termes de volume souterrain de Belgique. En février 2016, un modèle 3D haute résolution de la Salle du Dôme est réalisé par acquisition lasergrammétrique (lidar terrestre). Ce modèle a permis la représentation visuelle complète de la cavité, mais constitue le support d'autres projets : cartographie détaillée du sol, quantification de la calcite de parement, contexte de formation des spéléothèmes, compréhension du microclimat de la grotte. Cette présentation se focalise sur l'analyse structurale du plafond de la salle constitué par un pli-faille à partir du modèle 3D établi. L'intérêt de ce travail est de tester l'efficacité d'une analyse lidar dans le cadre d'une analyse structurale de la fracturation des calcaires karstifiés, sachant que les parois des cavités karstiques sont souvent peu accessibles directement. L'analyse de la fracturation de la Salle du Dôme est ensuite intégrée à la connaissance tectonique du massif karstifié. Le modèle est constitué d'un nuage de points d'une résolution suffisante pour distinguer les plans de stratification ainsi que le ou les plans de faille recoupant les structures plicatives du plafond de la salle. Le modèle 3D est exploité sur le logiciel de rétro-ingénierie 3D Reshaper. L'horizontale étant fixée lors de l'acquisition des données numériques dans la grotte, il est nécessaire d'orienter systématiquement le nuage de points afin de pouvoir générer les surfaces observées. La visualisation géométrique du pli-faille reconnu à partir du modèle est obtenue en mettant en place une succession de plans créés à partir de trois points sur les différents plans de stratification. La direction et le pendage de chaque plan sont déterminés par trigonométrie à partir des coordonnées 3D des normales. Celles-ci sont disponibles au travers des propriétés du plan induit par le programme. Les directions et les pendages de plus de 200 plans tracés permettent l'analyse du pli-faille. A partir de ces relevés sur le modèle 3D, un canevas structural du plafond est proposé. Ainsi, cette méthode d'analyse innovante permet une étude renouvelée et complète de la structure du plafond de la Salle à une autre échelle des relevés faits sur le terrain.

**Mots-Clés:** Salle du Dôme, Lidar, Modèle 3D, pli, faille, analyse structurale

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: elise.kazmierczak@ulb.ac.be

## L'électromagnétisme héliporté, un outil d'infrastructure pour la connaissance géologique et hydrogéologique

Frederic Lacquement <sup>\*ψ1</sup>, Pierre Alexandre Reninger <sup>φ1</sup>, Benoit Vittecoq <sup>1</sup>, Guillaume Martelet <sup>1</sup>, Thierry Yannick <sup>1</sup>, Marc Dumont <sup>1</sup>, Aunay Bertrand <sup>1</sup>, Yoan Legendre <sup>1</sup>, Laure Ducreux <sup>1</sup>, Jacques Deparis <sup>1</sup>, Anne Raingeard <sup>1</sup>, Aude Nachbaur <sup>1</sup>, Anne-Lise Tailame <sup>1</sup>, Julien Bernard <sup>1</sup>, Caroline Prognon <sup>1</sup>, Séverine Bès De Berc <sup>1</sup>, Benoit Le Moigne <sup>1</sup>, Hélène Tissoux <sup>1</sup>, José Perrin <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

L'amélioration de la connaissance du sous-sol passe par la mise en œuvre d'outils d'acquisition innovants. Initialement développé pour la prospection minière, l'ElectroMagnétisme héliporté (HEM) a bénéficié d'améliorations significatives ces 20 dernières années, notamment sur la résolution de proche sub-surface qui atteint désormais quelques mètres. Cet outil permet d'imager les variations de conductivité électrique du sous-sol, dues principalement à la nature des roches et fluides en présence, et ce, jusqu'à plusieurs centaines de mètres de profondeur. L'utilisation de moyens héliportés rend possible l'acquisition de plusieurs centaines à milliers de kilomètres linéaires en quelques jours. Lors d'un levé, des centaines de milliers de mesures sont acquises le long des lignes de vol reconstituant ainsi des coupes de contrastes électriques.

Depuis une dizaine d'années, le BRGM a conduit de nombreux levés HEM : en Région Centre, puis, avec une couverture haute résolution, sur l'ensemble des îles de Mayotte (2010), Martinique (2013), Guadeloupe (2013), La Réunion (2014) et sur quelques secteurs en Nouvelle-Calédonie (2015).

Cette méthode a démontré sa capacité à fournir des informations pertinentes dans des contextes géologiques variés (sédimentaires, métamorphiques, plutoniques ou volcaniques). Les couvertures HEM constituent des données d'infrastructure utilisées en développement et, de façon croissante, en production. Quelle que soit la qualité d'affleurement en surface, l'étendue du couvert végétal ou la présence de relief, cette méthode fournit une information continue et met en évidence les variations spatiales des structures et la répartition des unités (hydro-)géologiques le long de coupes plurikilométriques. Le couplage des levés EM avec les observations de terrain et les forages permet aux géologues de restituer, de manière quantifiée, la géométrie des objets géologiques et leurs relations, depuis l'échelle régionale jusqu'à des sites d'études de quelques centaines de mètres d'extension. A partir d'exemples réalisés ces 8 dernières années, la présentation montrera le potentiel et les limites de l'outil HEM dans les domaines de la cartographie géologique, de l'implantation de forages en eau, de la modélisation (hydro-)géologique, de la prospection en matériaux ou de gisements miniers et des risques naturels.

**Mots-Clés:** Géophysique, Géologie, Hydrogéologie, Électromagnétisme héliporté

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: f.lacquement@brgm.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: pa.reninger@brgm.fr

## Caractérisation de l'altération en domaine cristallin et application aux risques naturels - Exemple du Massif des Maures

Frederic Lacquement <sup>\*1</sup>, Yannick Thiery <sup>†2</sup>, Nathalie Marçot <sup>‡3</sup>

<sup>1</sup> Direction des Géoressources – BRGM – France

<sup>2</sup> Direction des risques et de la Prévention – BRGM – France

<sup>3</sup> Direction régionale PACA / Marseille – BRGM – France

Tous les géologues qui travaillent dans les domaines de socle cristallin sont confrontés à la recherche d'affleurements pour décrire les lithologies, échantillonner et caractériser les structures les affectant. En effet, les roches présentes à l'affleurement sont systématiquement altérées, selon une intensité variable. Jusqu'à la fin des années 1980, ces altérations n'étaient que peu étudiées et rarement cartographiées. Depuis, les phénomènes d'altération sont étudiés sous l'angle des paléo surfaces et caractérisées par un horizon meuble (altérite) issu de la dégradation du substrat. Ainsi, par exemple, les arènes granitiques se développent au dépend des granites. Sur les cartes géologiques les altérites sont représentées depuis la fin des années 1990.

Pour répondre aux problématiques de compréhension des phénomènes de glissements de terrain dans le Sud de la France (Massif des Maures, Var), il est indispensable de s'intéresser à la nature des roches et à leur état d'altération. En effet, dans des régions géologiquement équivalentes, notamment du sud de l'Italie ou en Nouvelle-Zélande), il a pu être démontré le lien étroit entre le degré d'altération des roches et les phénomènes érosifs. Or, les cartes géologiques des Maures ne contiennent pas d'information renseignant sur la présence d'altération.

L'état actuel des roches résulte de la combinaison de plusieurs événements d'altération dont l'identification permet de distinguer une phase ancienne créant un profil épais, profondément érodé et structuré appelé paléo altération, sur laquelle se surimpose un profil superficiel peu épais appelé altération morphologique. Pour chaque nature lithologique de la roche mère, il est défini un profil d'altération type construit sur une description macroscopique simple originale. De ces descriptions, un croisement des observations de terrain avec les données de MNT et de la structure intrinsèque acquise au cours de l'orogénèse varisque met en évidence un lien entre la lithologie, le degré d'altération des roches et la valeur de pente naturelle et conduit à proposer une approche prédictive pour la caractérisation de la nature des roches en surface. En découle une méthodologie exploratoire, bâtie sur les observations de terrain, afin d'obtenir rapidement les informations nécessaires pour améliorer les connaissances sur les facteurs de prédisposition et de déclenchement des glissements de terrain superficiels.

**Mots-Clés:** altération, risques naturels, Maures, cartographie prédictive, régolithe

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>†</sup>Auteur correspondant: y.thiery@brgm.fr

<sup>‡</sup>Auteur correspondant: n.marçot@brgm.fr

## Une spéléogenèse à acide sulfurique dans le piémont nord-pyrénéen ?

Dimitri Laurent <sup>\*1</sup>, Eric Gaucher <sup>2</sup>, Cedric Carpentier <sup>3</sup>, Christophe Durlet <sup>4</sup>, Pauline Collon <sup>5</sup>,  
Jacques Pironon <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centre de recherches sur la géologie des matières premières minérales et énergétiques (CREGU) - Université de Lorraine, CNRS UMR7359-CREGU - France

<sup>2</sup> TOTAL-Scientific and Technical Center Jean Féger (CSTJF) - TOTAL - France

<sup>3</sup> University of Lorraine / CNRS / CREGU, GeoRessources Laboratory (GeoRessources) - Université de Lorraine - Faculté des Sciences et Technologies, Campus Aiguillettes, rue Jacques Callot, BP 70239, 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy, France

<sup>4</sup> Biogéosciences [Dijon] (BGS) - Centre National de la Recherche Scientifique : UMR6282, Université de Bourgogne - France

<sup>5</sup> University of Lorraine / CNRS / CREGU, GeoRessources Laboratory (GeoRessources) - Université de Lorraine - France

Tout au long de l'histoire de structuration des Pyrénées, le jeu des grands accidents tectoniques font de la zone de piémont nord-pyrénéen une aire privilégiée de circulation de fluides. Parmi ceux-ci, la présence de saumures profondes riches en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>S a été attestée dans les réservoirs pétroliers sud-aquitains d'âge Crétacé. Impliqués dans des processus de migration vers les marges de bassin, ces fluides sont susceptibles de former des cavités dans l'encaissant calcaire là où les remontées d'H<sub>2</sub>S entrent en contact avec du dioxygène, produisant ainsi du H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. C'est cette hypothèse de spéléogenèse à acide sulfurique (SAS) que la présente étude cherche à explorer dans les Pyrénées.

Les premières campagnes de terrain dans les massifs karstiques d'âge Jurassique-Crétacé inférieur des Arbailles (Pyrénées-Atlantiques) et de St-Pé-de-Bigorre (Hautes-Pyrénées) mettent en évidence au sein de plusieurs karsts des indices morphologiques (chenaux de voûte, coupoles, poches de substitution) et minéraux (sulfates, sulfures, carbonates hydrothermaux) compatibles avec la SAS. Ces réseaux karstiques sont notamment localisés proche de sources thermominérales chlorurées sodiques et contenant pour certaines des concentrations anormales en sulfates et sulfures.

L'objectif de cette étude consistera à replacer cette spéléogenèse dans le continuum des interactions fluides-roches ayant affecté la zone nord-pyrénéenne, depuis l'hyper-extension au Crétacé jusqu'à aujourd'hui. Dans un premier temps, le lien entre les morphologies karstiques, la fabrique structurale des marqueurs de fluide et le contexte tectonique sera discuté dans le but de reconstruire la dynamique des karsts hypogènes et de l'intégrer dans l'histoire géologique des Pyrénées. Ensuite, en s'appuyant sur les analyses minéralogiques et la géochimie isotopique du soufre des minéraux témoins de la SAS, nous nous attacherons à établir les séquences paragénétiques de dissolution/précipitation des karsts ainsi qu'à décrypter la source des fluides impliqués dans le creusement des cavités.

**Mots-Clés:** Pyrénées, spéléogenèse à acide sulfurique, karst hypogène, géomorphologie, géologie structurale, interactions fluide, roche, isotopie du soufre

\*Intervenant



## Modélisation 3D de l'hémigraben d'Eripol par le logiciel CATIA de la plateforme 3DEXPERIENCE ® (Dassault Systèmes ®)

Pauline Louis <sup>\*1</sup>, Fanja-Emeline Raharison <sup>1</sup>, Lise Gransac <sup>1</sup>, Julien Duquennoy <sup>1</sup>, Yannick Vautier <sup>1</sup>

<sup>1</sup> UniLaSalle – Institut Polytechnique UniLasalle – France

L'hémigraben d'Eripol se situe dans les Pyrénées espagnoles (province de Huesca, Aragon), dans le couloir décrochant de la bordure ouest de la nappe des Sierra Marginales. Il est formé de huit failles normales d'orientation générale Nord 60°, formant un fossé d'effondrement s'étendant sur un kilomètre. Cette étude se concentre sur la modélisation en trois dimensions de l'hémigraben, dont le but est de valider les interprétations faites sur des supports en deux dimensions (telles que la carte géologique ou les coupes géologiques). Pour cela, des outils et méthodes de l'industrie ont été appliqués à un contexte académique. La modélisation a été réalisée sur le logiciel CATIA de la plateforme 3DEXPERIENCE ® développée par Dassault Systèmes ®.

CATIA est un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur, qui permet de dessiner des objets en trois dimensions. Ce logiciel n'ayant pas été créé en premier lieu pour être utilisé dans le domaine des géosciences, une méthodologie spécifique a été développée et est encore en évolution. Une campagne de terrain a été menée, pendant un mois en septembre 2017 et a abouti à une cartographie géologique précise de la zone ainsi qu'à un ensemble de coupes géologiques (constituant un maillage resserré de la zone), qui ont ensuite été importées sous la 3DEXPERIENCE ®. Un Modèle Numérique de Terrain est utilisé pour modéliser le relief du terrain. Le traitement de l'ensemble de ces données sur CATIA a permis la réalisation du modèle en trois dimensions. Ce modèle numérique permet finalement d'obtenir une représentation de la zone d'étude reflétant les processus tectono-sédimentaires ayant été observés au sein de l'hémigraben. Il met en avant des erreurs de cartographie de l'ordre du mètre, rendues visibles par la modélisation 3D, permettant ainsi une amélioration et une correction des documents géologiques de terrain.. Enfin, une impression en trois dimensions du modèle à visée pédagogique a pu être effectuée. Elle sera utilisée auprès d'étudiants en première année du cursus Sciences de la Terre et de l'Environnement pour leur permettre de mieux appréhender la visualisation de structures géologiques.

**Mots-Clés:** modélisation 3D, graben, Eripol, Pyrénées, Dassault Systèmes ®, 3DEXPERIENCE ®, CATIA, impression 3D

Intervenant

## The Chalk karst of Normandy, France: reconstruction of the paleokarst levels along the Seine River basin and implication for landscape evolution

Carole Nehme <sup>\*1</sup>, Andrew Farrant <sup>2</sup>, Joël Rodet <sup>3</sup>, Dominique Todisco <sup>1</sup>, Diana Sahy <sup>2</sup>,  
Michael J. Grappone <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Identités et Différenciation de l'Environnement des Espaces et des Sociétés (IDEES) – Université de Rouen Normandie : UMR6266, CNRS

<sup>2</sup> British Geological Survey (BGS) – Royaume-Uni

<sup>3</sup> Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C) – Université de Rouen Normandie : UMR6143 – France

<sup>4</sup>University of Liverpool – Royaume-Uni

Caves in the Upper Cretaceous Chalk limestone are generally rare, but more common in the Normandy (France), with several hundred recorded sites. Most occur in the Seine valley and along the Pays de Caux coastline. Few caves are several km long with active streamways. Others are relict and preserved up to 90 m above sea level (asl). Many caves are infilled with sediment derived from Palaeogene/Quaternary and often display a paragenetic morphology. From a speleogenesis view, the caves spatial distribution suggests a link between cave elevation, Chalk stratigraphy and the incision of the River Seine. To better constrain the genetic context, high-resolution stratigraphy, topography and age datings analysis was used to understand the Quaternary evolution of the multi-level cave system along the Seine valley. Stratigraphical logs derived from laser scans combined with palaeontological sampling suggest that cave development may be associated with inception horizons within the Chalk sequence, in particular the Light Point hardground/Shoreham marl level at the top of the Lewes Nodular Chalk/base Seaford Chalk formations. The sediment infilling into caves attest to sediment inputs during various stages in the Quaternary. The studied caves include: Caumont (15 m asl), Funiculaire (40 m asl), Mt Pivin (70 m asl), Roche Percée (70 m asl). Although partially dated, they were reinvestigated to help constrain the timing of sediment infilling into the caves and to derive a minimal model age for the cave development related to the Seine incision. The River Seine has a very well-developed terrace system corresponding to seven incision stages covered by periglacial alluvial formations, but less well-dated. Along the Somme Basin adjacent to the Seine Basin, the highest terraces dated are up to 95 m asl. These terraces record valley incision that began at 1 Ma, supported by absolute ages and archeological findings. Our palaeomagnetic data showed both normal and reversed polarity from the Funiculaire cave whereas higher-level caves showed normal polarity, falling possibly in the Jaramillo normal period (0.9-1.06 Ma). Having normal and reversed polarity in the Funiculaire cave induce a cave genesis age at the Brunhes-Matuyama boundary c.780 ka concordant with a Seine level at/or > 40m. As for Caumont system (15 m asl), Uranium-Thorium dating (U/Th) of flowstone and calcite fragments at the ceiling showed ages ~100 ka and 300 ka. Therfore, the Caumont system was functional at least since 300 ka inferring that the Seine level was at/or below 15 m asl at the end of the Midlle Pleistocene. Whereas, at Mt-Pivin cave (70 m asl), U/Th dating on calcite incrusted in the ceiling showed an age of  $570 \pm 50$  and  $495 \pm 25$  ka BP 1950. These calcite ages, at the limit of the dating method, support the hypothesis of old cave genesis in the Normandy. The dates also support the reversed polarity palaeomagnetic data obtained from the Funiculaire cave (40 m asl).

**Mots-Clés:** karst, inception horizon, paleomagnetism, Normandy

## Cartographie lithologique prédictive: traitement de données électromagnétiques héliportées à Mayotte

Caroline Prognon <sup>\*ψ1,2</sup>, Julien Bernard <sup>2</sup>, Frederic Lacquement <sup>2</sup>, Anne Raingeard <sup>2</sup>,  
Pierre Alexandre Reninger <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO) – 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

<sup>2</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières – France

L'étude présentée s'inscrit dans le cadre de la Feuille de Route sur la lutte contre l'érosion des sols à Mayotte sollicitée par les autorités publiques (DEAL, 2012). Un ensemble d'actions a été mis en place afin de contrôler les différents facteurs déterminants de l'érosion hydrique des sols en milieux naturels, agricoles et d'habitat rural. Ces facteurs d'érodibilité, de sensibilité au ruissellement ou à l'infiltration imposent une bonne connaissance de la nature des matériaux de surface et notamment ceux facilement mobilisables.

En vue de fournir sur l'ensemble de l'île en 2019 une caractérisation et une cartographie de la nature lithologique des formations superficielles, un test méthodologique combinant observations, cartographie de terrain et traitement des données électromagnétiques (EM) héliportées (acquises à l'échelle de l'île en 2010) a été entrepris en 2017 sur deux bassins versants tests : Dzoumogné et Mtsamboro.

La campagne de terrain a permis d'y multiplier les points d'observations et de réaliser une cartographie lithologique des formations à l'échelle du 1/10 000. Afin de tester l'utilisation de l'EM comme support à la cartographie géologique de surface, des analyses statistiques ont été réalisées ; une CAH (Classification ascendante hiérarchique) liant plusieurs paramètres: résistivité de proche-surface, pente et courbure a ainsi été effectuée. Les premiers résultats indiquent une bonne corrélation entre les lithologies observées sur le terrain et les classes produites par la CAH. Ces résultats démontrent donc, après un retraitement et une inversion spécifiques des données, une sensibilité du signal EM à la nature lithologique de la proche surface et confirment le potentiel des données EM en termes de cartographie prédictive de la lithologie de surface. Les résultats sont donc encourageants pour apporter une information pertinente et utilisable sur l'ensemble du territoire mahorais.

**Mots-Clés:** cartographie prédictive, électromagnétisme héliporté, érosion

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: c.prognon@brgm.fr

## Méthodologie de cartographie prédictive de replats au sein d'un bassin versant par analyse semi-automatique du Modèle Numérique de Terrain

Anne Raingeard <sup>\*ψ1</sup>, Frederic Lacquement <sup>φ1</sup>, Bruno Tourlière <sup>1</sup>, Hélène Tissoux <sup>1</sup>,  
Pierre Alexandre Reninger <sup>1</sup>, François Prognon <sup>1</sup>, Julien Bernard <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

La connaissance des formations géologiques de surface du territoire français métropolitain est très largement hétérogène : parfois bien représentées dans leur contour et leur description, parfois totalement absentes alors qu'elles s'observent sur le terrain. La mise en œuvre de programmes d'acquisitions systématiques et continus à des échelles pertinentes sur l'ensemble du territoire ne peut être envisagée au vue de l'étendue à couvrir. Dès lors, trouver des solutions permettant d'aider à la représentation cartographique des objets géologiques de subsurface pour envisager l'accroissement de la connaissance est susceptible d'être une stratégie pertinente dans laquelle le BRGM s'est engagé depuis quelques années.

Une des voies de recherche consiste à définir des méthodologies de cartographie prédictive par le traitement et l'analyse d'imageries avec une validation grâce à des retours sur le terrain. Dans le cadre de l'identification cartographique des formations alluviales, une méthodologie de travail basée sur le Modèle Numérique de Terrain (25m de l'IGN) et de ses déclinaisons (dénivelée, pente, courbure, etc.) a été développée. La chaîne de traitement mise en œuvre permet d'obtenir une représentation cartographique prédictive de niveaux de terrasses morphologiques ainsi que des colluvions de fond de vallée et de bas de versant. Cette méthodologie de cartographie semi-automatique, par analyse de la topographie a été développée sur une zone test choisie au niveau du piémont pyrénéen (sous-bassins du Gave de Pau). Une campagne de terrain sur les bassins de la Baïse et de l'Ousse a permis de comparer les résultats de la cartographie prédictive et la réalité géologique. Les premiers résultats démontrent que l'analyse proposée est pertinente à l'échelle d'un bassin versant pluri-kilométrique non affecté par des failles. La méthodologie apporte une aide précieuse pour la cartographie de ces formations superficielles, notamment par un gain de temps conséquent lors du dessin et/ou lorsque les différences altimétriques ou morphologiques entre replats sont peu claires sur le terrain.

A terme, le développement d'une interface graphique permettant de réaliser l'ensemble des analyses des bassins versant en une seule application permettra de produire des cartes prédictives rapidement et d'aider à l'identification cartographique des formations alluviales étagées.

**Mots-Clés:** Cartographie prédictive, Alluvial, Modèle Numérique de Terrain

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: a.raingeard@brgm.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: f.lacquement@brgm.fr

## Recherche de corrélation entre la présence de produits phytosanitaires et la turbidité : cas de la fontaine d'Yport (Normandie, France)

Michaël Savary <sup>\*1</sup>, Viviane Pereira-Machado <sup>2</sup>, Catherine Gonzalez <sup>2</sup>, Anne Johannet <sup>\*3</sup>,  
Nicolas Massei <sup>1</sup>, Jean-Paul Dupont <sup>1</sup>, Emmanuel Hauchard <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C) - Centre National de la Recherche Scientifique : UMR6143,  
Université de Rouen Normandie, Institut national des sciences de l'Univers - France

<sup>2</sup> IMT - Mines Alès Ecole Mines - Télécom (IMT - MINES ALES) - DGCIS, Ministère de l'Industrie - France

<sup>3</sup> Laboratoire de Génie de l'Environnement Industriel (LGEI, IMT Mines Alès, Univ Montpellier, France) - Mines  
Alès, Univ Montpellier - France

<sup>4</sup> Communauté d'agglomération Havraise (CODAH) - Agglomération Havraise - France

En Normandie, l'eau potable est issue de l'exploitation de l'aquifère de la craie qui présente régionalement une forte réserve en eau et qui se trouve localement très karstifié. Du fait de l'érosion des sols et des nombreuses connections entre la surface et le sous-sol typiques des zones karstiques, la ressource en eau est fréquemment affectée par des évènements turbides. La dépendance de la turbidité par rapport à différents paramètres (remise en suspension, élévation du niveau de la nappe, condition hydrologique de surface et du sous-sol,...) fait qu'elle apparaît comme une variable susceptible d'être liée à l'apparition de produits phytosanitaires entraînés depuis la surface jusqu'au sein de l'aquifère.

Le bassin d'alimentation du captage d'Yport possède une superficie de 320km<sup>2</sup> avec une exploitation majoritairement agricole et naturelle (forêt). L'infiltration, rapide ou lente, s'effectue par le biais de dolines (ou bâties) concentrant le ruissellement causé par la présence de loess sur les plateaux karstiques responsables de la formation d'une croute de battance [Dupont, J. P. 2011]. L'eau ressurgit ensuite au niveau de sources localisées dans la zone tidale de la côte dont le débit moyen est estimé aux alentours de 1m<sup>3</sup>/s [Bassompierre, P. 1957]. Le captage d'Yport est situé à 1 km en amont des sources au niveau d'un drain karstique et produit un volume moyen de 3 950 000 m<sup>3</sup>/ans [Rapport annuel CODAH 2013].

Dans ce contexte, cette présentation va s'intéresser aux liens entre la turbidité, et plus généralement les variables environnementales, et la présence de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines.

**Mots-Clés:** Karst, turbidité, produits phytosanitaires, Fontaine d'Yport

\*Intervenant

## IFREEMIS, vers un lieu ressource dédié aux milieux souterrains et environnements karstiques

Christophe Vigne <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> Syndicat Mixte Espace de Restitution Grotte Chauvet Pont d'Arc (SMERGC) – Région Auvergne Rhône Alpes, Département de l'Ardèche – France

Différents acteurs des milieux souterrains (universités, gestionnaires d'espaces naturels, collectivités locales, acteurs du tourisme, instances sportives fédérales, cluster, organismes de formation, ...), s'unissent pour la création d'IFREEMIS, un centre de ressources sur les milieux souterrains susceptible de construire des passerelles entre eux et de constituer le ferment d'une approche plus globale de ces milieux.

Les milieux souterrains sont encore trop rarement abordés en France comme des espaces à part entière en termes de problématiques environnementales et territoriales, appréhendés de manière segmentée, par leurs usages, par catégories d'acteurs ou par champs disciplinaires. Or, ils présentent des écosystèmes complexes dont la compréhension nécessite une approche globale donc pluridisciplinaire pour mieux préserver leurs ressources, écosystèmes et patrimoines.

Le projet IFREEMIS vise à créer en Ardèche un centre de ressources sur les milieux souterrains et les environnements karstiques, destiné à :

- Créer des passerelles entre les différents champs de connaissance ou d'expertise, améliorer leur compréhension, leur protection et leur valorisation : culture & patrimoine, recherche scientifique, tourisme, pratiques sportives, protection de l'environnement, innovations technologiques, ... et favoriser les échanges et collaboration
- S'inscrire en tant que pôle d'expertise à l'international afin d'accompagner les porteurs de projets de valorisation touristique durable des patrimoines karstiques dans la définition et le montage de leur projet.

Il devrait notamment prendre appui sur

- la création d'un hôtel à projets/pôle d'accueil assorti d'une offre d'accueil intégrée, à l'attention des organismes de formation et de recherche,
- un pôle ressource constitué d'un ou plusieurs observatoires communs, de banques de données mutualisées, d'outils notamment numériques ainsi qu'une offre de formation initiale et continue
- un réseau d'acteurs diversifiés et d'expertises pluridisciplinaires inscrits dans des projets communs et dans une offre de service et d'accompagnement de porteurs de projets à l'échelle internationale.

La communication vise donc à partager les enjeux de ce projet avec la communauté scientifique, à échanger autour des axes de travail préfigurant son développement, à la mobiliser autour de la construction de cette plate-forme.

**Mots-Clés:** karst, milieux souterrains, ressources, plateforme, formation, recherche, plateforme, outils

<sup>\*</sup>Intervenant

## Apport du scan laser 3D en cavité à la modélisation géologique et géotechnique du proche sous-sol urbain

Silvain Yart <sup>\*1</sup>, Thomas Dewez <sup>1</sup>, Cécile Allanic <sup>1</sup>, Graniel Courrioux <sup>1</sup>, Imed Ksibi <sup>2</sup>, Simon Lopez <sup>1</sup>,  
Gildas Noury <sup>1</sup>

<sup>1</sup> BRGM – Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

<sup>2</sup> Orléans Métropole, Direction de l’Environnement et de la Prévention des Risques Majeurs – Orléans Métropole – France

Les nombreuses cavités anthropiques que compte le sous-sol des villes d’Europe constituent des points d’observation privilégiés de la géologie locale, dans des environnements où l’accès au terrain naturel est souvent compliqué par l’anthropisation des sols. Nous montrons dans cette présentation comment la numérisation 3D de ces cavités au scanner laser mobile permet de documenter la géométrie des formations encaissantes et d’apporter des contraintes à des modèles géologiques 3D adaptés à l’échelle des projets d’aménagements urbains.

La géométrie 3D des cavités souterraines accessibles est aujourd’hui facilitée par la démocratisation des scanners laser mobiles. Une fois géoréférencées, les données acquises fournissent une représentation 3D des vides souterrains avec une précision inférieure à 1 m. La valorisation directe de ces données dans les modèles géologiques est rendue complexe par les limitations des logiciels de modélisation qui ne permettent pas d’intégrer tels que les centaines de millions de points issus des scans 3D. Nous proposons ici deux approches permettant la valorisation de ces données dans les modèles géologiques : Le premier scenario consiste à utiliser la géométrie des formations géologiques mesurée dans la cavité comme contrôle indépendant de la géométrie prédictive par le modèle géologique. Le second scenario utilise les mesures structurales effectuées soit directement sur le nuage de points 3D, soit manuellement sur le terrain et reportées sur le nuage de points, comme contraintes pour l’élaboration du modèle géologique.

Ces deux scénarios ont été testés sur une carrière souterraine de 2700 m<sup>2</sup> creusée dans les Calcaires de Beauce à Orléans. Le modèle 3D de la cavité, numérisée à l’aide d’un scanner laser mobile ZEB-REVO a été interfacé avec un modèle géologique tabulaire décrivant trois couches géologiques. L’attribution de paramètres mécaniques aux formations modélisées conduit à la construction d’un modèle géotechnique qui constitue in fine un élément crucial de connaissance du proche sous-sol au sein d’un BIM (Building Information Model).

**Mots-Clés:** Scanner laser mobile, Cavité, Sous sol urbain, Géomodélisation, BIM

Intervenant

## Le scanner laser 3D mobile, un outil complémentaire à la microgravimétrie pour la détection fine de cavités souterraines en milieu urbain. Application aux crayères de Champagne

Silvain Yart <sup>\*1</sup>, Thomas Jacob <sup>1</sup>, Ysoline Hannion <sup>1</sup>, Pierre Pannet <sup>1</sup>, Florian Masson <sup>1</sup>

<sup>1</sup> BRGM – Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

En Champagne, l'extraction de la craie s'est faite par des exploitations souterraines pyramidales appelées crayères. Ces cavités, de 15 à 40 m de profondeur et de 1000 à plus de 5000 m<sup>3</sup> de volume, sont souvent regroupées en grappes pouvant compter jusqu'à plusieurs dizaines d'ouvrages, aujourd'hui situés en zone urbaine. Certaines de ces exploitations ont été reconvertis pour d'autres usages. D'autres ont été comblées. D'autres enfin ont été laissées vides et abandonnées. L'extension des zones urbanisées nécessite de retrouver et de caractériser ces vides souterrains afin de les intégrer dans le dimensionnement des projets d'aménagement.

La microgravimétrie, méthode non destructive et facile à mettre en œuvre sur de grandes surfaces, est couramment utilisée pour la détection de vides souterrains. Cependant l'interprétation des anomalies gravimétriques mesurées peut s'avérer complexe du fait (i) de la coalescence d'anomalies générées par des volumes de vides importants et proches les uns des autres, et (ii) de la présence du bâti et des infrastructures souterraines qui influencent les variations locales de la gravité en milieu urbain.

Nous présentons ici deux cas d'étude où la réalisation d'un relevé 3D à l'aide d'un scanner laser mobile ZEB-REVO permet d'affiner l'interprétation de la microgravimétrie. La mise en œuvre d'un relevé au ZEB-REVO permet d'obtenir en peu de temps, et avec une précision infra-métrique, un modèle numérique 3D d'objets complexes et difficilement accessibles aux techniques de topographie classique.

Le premier site étudié est un chantier de réhabilitation d'un ancien terrain militaire sous-cavé en périphérie de Châlons-en-Champagne. Des fouilles entreprises aux apex des anomalies mises en évidence par microgravimétrie ont permis de retrouver et d'ouvrir les essors de deux groupes de crayères vides. Le relevé 3D de ces crayères a été utilisé pour simuler la carte d'anomalie gravimétrique générée par ces vides. Cette anomalie calculée, une fois retranchée à l'anomalie mesurée, permet de démontrer l'existence et de localiser d'autres crayères non retrouvées à proximité.

Le second site se situe dans le quartier historique de St Rémi à Reims. Plusieurs galeries accessibles sous les monuments historiques du quartier ont été relevées par ZEB-REVO, et leurs effets ôtés à l'anomalie gravimétrique résiduelle. Des anomalies persistantes sont mise en évidence, témoignant de la présence de vides non-reconnus.

Ces deux exemples illustrent que le couplage entre microgravimétrie et relevé 3D des cavités est une méthodologie qui permet d'affiner la détection des cavités, et se doit d'être mise en œuvre dès qu'applicable.

**Mots-Clés:** Cavité, Crayère, Scan 3D, Microgravimétrie

<sup>\*</sup>Intervenant

## **13.3. Apports des analyses thermiques à la caractérisation de la matière organique des sols**

## Thermal analysis based models to quantify centennially persistent soil organic carbon and 20 year soil organic carbon loss in temperate soils

Pierre Barré <sup>\*1</sup>, Laure Soucemarianadin <sup>1</sup>, François Baudin <sup>2</sup>, Claire Chenu <sup>3</sup>, Florence Savignac <sup>2</sup>, Lauric Cecillon <sup>4</sup>

1 Laboratoire de Géologie de l'ENS - CNRS : UMR8538, Ecole Normale Supérieure de Paris - ENS Paris - 24 rue Lhomond 75005 Paris, France

2 ISTE-P – Sorbonne Universités, UPMC, CNRS – France

3 AgroParisTech – Institut national de la recherche agronomique (INRA) – France

4 ECODIV – Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture - IRSTEA (FRANCE) – France

The organic carbon reservoir of soils is a key component of climate change, calling for an accurate knowledge of the residence time of soil organic carbon (SOC). Existing proxies and models of the size of SOC labile and persistent pools are time consuming and inaccurate. Thermal analyses of bulk soil samples have recently been shown to provide useful and cost-effective information regarding the long-term in-situ decomposition of SOC. The objective of this study was to build regression models based on Rock-Eval (RE) thermal analysis to quantify the proportion of centennially persistent SOC and 20 year SOC loss in a soil sample with known uncertainty. We used archived soil samples from 4 long-term agronomic experiments in North-Western Europe with bare fallow and associated non bare fallow treatments. We built 2 reference sample sets with observed SOC loss over a 20 year period (CL20; n=38) or estimated size of the centennially persistent SOC (CPsoc; n = 118). CL20 in bare fallow treatments ranged from 0.8 to 14.3 gC.kg<sup>-1</sup>, representing 9 to 51% of total SOC. The size of the CPsoc pool ranged from 14 to 100% of total SOC in bare fallow and associated non bare fallow treatments. Simple linear regression models were used to predict CL20 while a random forest multivariate regression model was used to predict the size of the CPsoc pool, using a series of RE parameters. The RE hydrogen index yielded the best simple linear regression model for the prediction of CL20 ( $R^2 > 0.7$ ). The random forest multivariate regression model showed an excellent predictive performance for the size of the CPsoc pool with validation  $R^2 > 0.9$  and validation error of prediction below 7%. This study demonstrates that the RE thermal analysis method can predict 20 year SOC loss and the size of the centennially persistent SOC pool, as assessed by long-term in-situ decomposition experiments. Rock-Eval appears to be a more accurate and convenient proxy of the size of SOC pools than other existing methodologies. Future developments include the validation of these models based on RE thermal analysis on soils from contrasted pedoclimatic conditions.

**Mots-Clés:** Soil organic carbon, Rock, Eval, Persistent Carbon, Kinetic pools

\*Intervenant

## Long-term legacy effects of wildfires on soil organic carbon stability in French Mediterranean forests

Lauric Cécillon <sup>\*1</sup>, François Baudin <sup>2</sup>, Jean Jacques Brun <sup>3</sup>, Sébastien De Danieli <sup>3</sup>, Suzanne Lutfalla <sup>4</sup>, Laure Soucemarianadin <sup>5</sup>, Michel Vennetier <sup>6</sup>, Pierre Barré <sup>5</sup>

<sup>1</sup> ÉTUDE ET COMPRÉHENSION DE LA BIODIVERSITÉ (ECODIV) – Irstea – France

<sup>2</sup> Institut des sciences de la Terre de Paris (UMR 7193) – Université Pierre et Marie Curie Paris 6 – France

<sup>3</sup> LESSEM – Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture – France

<sup>4</sup> École normale supérieure [ENS] – Ecole Normale Supérieure de Paris - ENS Paris – France

<sup>5</sup> Laboratoire de Géologie de l'ENS (LGE) – Ecole Normale Supérieure de Paris - ENS Paris – France

<sup>6</sup> Centre d'Aix-en-Provence – IRSTEA – France

Wildfires are natural disturbances that strongly affect soil organic carbon (SOC) stocks in Mediterranean forests. Little is known on the long-term effects of Mediterranean wildfires on SOC stability and the size of SOC kinetic pools, which would improve our understanding of SOC dynamics in Mediterranean regions. In this study, we aim at providing qualitative information on SOC stability as well as quantitative estimates of the size of the centennially persistent SOC (CPSOC) pool under contrasted Mediterranean wildfire disturbance regimes. We sampled soils from 25 oak forest plots with different wildfire histories over six decades, but similar pedoclimates in a French Mediterranean region (Maures mountains). A wildfire history index (WHI) is used to represent the number and the age of fires for each forest plot, high WHI values characterizing plots with more frequent and recent fires. At each plot we collected topsoils (0-5 cm depth) and soil biogenic structures (earthworm casts). Qualitative proxies of SOC stability and quantitative estimates of the size of the CPSOC pool are obtained with Rock-Eval 6, a thermal analysis technique consisting in the sequential pyrolysis (200-650°C) and oxidation (300-850°C) of SOC. SOC stability approximated as the proportion of SOC resistant to pyrolysis at 650°C increases with WHI and is higher in topsoils than in soil biogenic structures under all wildfire disturbance regimes. Similarly, the temperature at which 50% of the carbon resulting from the SOC pyrolysis has thermally evolved (T<sub>50</sub>\_PYR) increases with WHI and is higher in topsoil than in earthworm casts. Conversely, the temperature at which 50% of the carbon resulting from the SOC oxidation has thermally evolved (T<sub>50</sub>\_OX) is not altered by wildfire disturbance or biological processing by earthworms. The size of the CPSOC pool is estimated by a regression model using Rock-Eval 6 parameters as predictors, which was calibrated in long-term experimental sites in Northwestern Europe. Thermal characteristics of our Mediterranean samples are within or close to the thermal application range of the model. The percentage of CPSOC increases significantly with WHI, from 25-30% of SOC in forest topsoils not burnt since 1950 to 40-50% of SOC in topsoils experiencing frequent and recent wildfires. The percentage of CPSOC is also higher in topsoils than in earthworm casts. Our study demonstrates the long-term legacy effects of Mediterranean wildfires on SOC stability that are visible in topsoils and soil biogenic structures. Wildfire disturbances increase the size of the centennially persistent SOC pool due to newly formed pyrogenic carbon. Long-term (> 50 years) SOC recovery after wildfire disturbances is thus accompanied by a decrease in SOC stability as new and unstable carbon progressively accumulates in topsoil.

**Mots-Clés:** Soil organic carbon, thermal analysis, Rock, Eval

## Quelle est la signification des rapports H/C élevés déterminés dans la matière organique isolée de certains cherts archéens (3,5 à 3,0 Ga) ?

Frédéric Delarue <sup>\*1</sup>, Sylvie Derenne <sup>2</sup>, François Robert <sup>3</sup>, François Baudin <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrossystèmes et les Sols (METIS) - Sorbonne Université UPMC Paris VI, EPHE, CNRS : UMR7619 - France

<sup>2</sup> Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrossystèmes et les Sols (METIS) - Sorbonne Université UPMC Paris VI, EPHE, CNRS : UMR7619 - France

<sup>3</sup> Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie (IMPMC/MNHN) - Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN), Sorbonne Université UPMC Paris VI, CNRS : UMR7590 - France

<sup>4</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTEPI) - Sorbonne Université UPMC Paris VI, CNRS : UMR7193 - France

Ayant subi une altération thermique poussée, la matière organique (MO) archéenne est généralement appauvrie en composés hydrogénés. Cependant, certaines - notamment parmi celles isolées de roches silicifiées - sont enrichies en H ( $H/C > 0.5$ ). L'origine de ces rapports élémentaires élevés demeure méconnue, bien qu'ils pourraient refléter une préservation exceptionnelle de composés hydrocarbonés et de biomarqueurs moléculaires associés, nécessaires pour décrire l'évolution de la vie primitive. Nous avons donc étudié la signification des rapports H/C sur diverses MO isolées de roches datées de 3,5 à 3,0 Ga. Pour ce faire, ces MO ont été étudiées par analyse élémentaire, spectrométrie de masse à ionisation secondaire (NanoSIMS), spectroscopie Raman et pyrolyse Rock-Eval.

La comparaison entre les rapports atomiques H/C globaux obtenus par analyse élémentaire et  $^{13}CH_3/^{12}C_2$ -déterminés directement sur la MO par NanoSIMS montre que le rapport H/C peut-être biaisé (+800%) par la présence de minéraux hydrogénés associés à la MO. Un tel biais n'est pas enregistré lors de la pyrolyse des échantillons archéens suggérant en retour que les effluents hydrocarbonés proviennent essentiellement du craquage thermique de la MO. Contrairement au pyrogramme classique de kérogène, qui consiste en une simple courbe gaussienne, les pyrogrammes obtenus sur la MO archéenne isolée ont une forme multimodale. Ceci reflète la coexistence (i) de phases thermolabiles craquant entre 300 et 450°C et (ii) d'une à deux phases réfractaires caractérisées par une gamme de température de craquage restreinte (576 à 586°C). Respectivement attribués à (i) la volatilisation des bitumes résiduels syngénétiques ou de bitumes solides et (ii) au craquage thermique des liaisons covalentes du kérogène, ces résultats suggèrent que les variations du H/C dans la MO archéenne isolée intègrent le contenu hydrocarboné de la fraction insoluble et de la fraction soluble résiduelle.

Au-delà de l'existence de minéraux hydrogénés et de phases solubles résiduelles pouvant perturber l'utilisation du rapport H/C comme indicateur strict du contenu hydrocarboné des kérogènes archéens, ces travaux démontrent l'existence de bitumes syngénétiques et d'une fraction faible mais quantifiable d'hydrocarbures liés à la MO archéenne posant ainsi de nouveaux jalons pour la recherche de biomarqueurs moléculaires dans les plus anciennes roches terrestres.

**Mots-Clés:** Bitume, Chert, kérogène, Pyrolyse Rock, Eval, Spectroscopie Raman

\*Intervenant

## Rock-Eval pyrolysis of density fractions from tropical soils of Western Uganda

Stéphanie Grand <sup>\*ψ1</sup>, Fanny Viret <sup>1</sup>, David Sebag <sup>2</sup>, Eric Verrecchia <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Lausanne, Faculté des Géosciences et de l'Environnement (UNIL-FGSE) – Suisse

<sup>2</sup> Université de Rouen – Université de Rouen Normandie – France

Current understanding indicates that organo-mineral interactions play a key role in soil organic matter dynamics, yet we have very little empirical information on these interactions in natural soils. The relative importance of silicates (particularly phyllosilicate clays) and oxides in different edaphic environments remains unclear, while the properties of organic matter engaged in these association is equally debated. Density fractionation is a useful technique to isolate organo-mineral complexes according to their mineralogical composition, in view of further characterization.

In this study, we performed density fractionation of tropical soils from the western (Albertine) branch of the African Rift area. Soils ranged from highly weathered, desilicified, oxide-dominated Plinthosols to relatively young soils still bearing weatherable silicates. We separated soils into 6 fractions : (1) the free light fraction corresponding to particulate organic matter, (2) the occluded light fraction corresponding to organic matter present inside aggregates, (3) fine silicates (< 8 microns) corresponding essentially to phyllosilicates and their associated organic matter, (4) coarse silicates (> 8 microns) corresponding to primary silicates and their associated organic matter, (5) fine oxides and their associated organic matter and (6) coarse silicates and their associated organic matter. We subsequently subjected each fraction to Rock-Eval pyrolysis and calculated the I ('immaturity') and R ('recalcitrance') indices based on the S2 curve.

Results showed that free and occluded organic matter formed a continuum along the 'humic trend', which is thought to represent gradual decomposition and transformations of organic matter in soils. Organic matter associated to silicates was also found on the 'humic trend' but in a very narrow region near the centre, suggesting that only a very specific type of organic matter participates in these interactions. Most surprising were results for the oxide-associated organic matter, which showed sharp departures from the humic trend. These differences were matched by patterns observed in organic matter composition (C:N ratios and pseudo Van-Krevelen plots). Altogether, these findings demonstrate that the organo-mineral association is preferential, with specific organics interacting with specific types of minerals. Uncertainty remains regarding the influence of the mineral matrix (particularly for the oxide fraction) on pyrograms.

**Mots-Clés:** Tropical soils, mineralogy, iron oxides, density fractionation, Rock-Eval 6, soil organic matter

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: stephanie.grand@unil.ch

## Analyse de composés organiques purs par pyrolyse Rock-Eval et influence de la matrice minérale

Eva Kanari <sup>\*1,2</sup>, Pierre Barré <sup>3</sup>, François Baudin <sup>4</sup>, Lauric Cecillon <sup>5</sup>, Florence Savignac <sup>2</sup>,  
Laure Soucemarianadin <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Géologie de l'ENS (LGE) – Ecole Normale Supérieure de Paris - ENS Paris - France

<sup>2</sup> ISTeP – Sorbonne Universités, UPMC, CNRS – France

<sup>3</sup> Laboratoire de géologie de l'ENS (LGE) – CNRS : UMR8538 – 24 Rue Lhomond 75231 PARIS CEDEX 05, France

<sup>4</sup> Institut des sciences de la Terre de Paris (UMR 7193) – Université Pierre et Marie Curie Paris 6 – France

<sup>5</sup> ECODIV – Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture - IRSTEA (FRANCE) – France

L'utilisation croissante de la pyrolyse Rock-Eval pour caractériser les matières organiques des sols et des sédiments récents a conduit Carrie et al. (2012) à analyser des produits organiques purs en vue d'interpréter les signaux et paramètres classiques de cette technique : S1, S2, S3, Tmax, index d'hydrogène et d'oxygène, etc. Si leur démarche est intéressante, elle a toutefois été menée avec une méthode inappropriée puisqu'ils ont utilisé le mode 'bulk rock basic' adapté aux roches mères pétrolières. En effet, la température initiale de 300 °C qui caractérise ce mode conduit à une thermovaporisation brutale et précoce des produits organiques purs d'où des pics S1 très forts et des Tmax parfois aberrants.

Il nous a semblé important de reprendre l'approche de Carrie et al. (2012) en commençant la pyrolyse à 200°C, tel que préconisé par Disnar et al. (2003) pour l'analyse des sols. Nous avons choisi d'analyser de l'albumine de sérum bovin, de la cystéine, du glucose, de la cellulose et du cholestérol comme composés modèles représentant des protéines, des carbohydrates et des lipides. Par ailleurs, nous avons examiné l'influence de différentes matrices minérales lors de la pyrolyse de ces produits purs à l'image de ce qu'avaient fait Espitalié et al. (1984) avec les kérogènes. Du sable de Fontainebleau, de la calcite, de la kaolinite, de la montmorillonite et des oxy-hydroxydes de fer (maghémite et goethite) ont ainsi été ajoutés à sec à chacun de ces produits purs. Le bilan carbone fourni par la pyrolyse Rock-Eval a été comparé avec les résultats d'une analyse élémentaire sur les mêmes mélanges synthétiques.

Les résultats montrent que dans la plupart des cas le bilan carbone du Rock-Eval est déficitaire et que celui-ci l'est d'autant plus que les produits sont associés à des oxy-hydroxydes de fer. Ces oxydes ont un effet catalytique qui favorise le craquage thermique du produit (fort pic S1) et la génération de composés oxygénés (CO et CO<sub>2</sub>) aux dépens du S2. Le sable n'apparaît pas aussi inerte que prévu sur les produits purs. La kaolinite et la montmorillonite ont des effets contrastés selon la nature des produits. Il semblerait que la montmorillonite favorise la formation de coke pendant la phase de pyrolyse d'où une diminution de la part de carbone pyrolysable au profit du carbone résiduel.

**Mots-Clés:** Analyse Rock Eval 6, composés purs, effet de la matrice minérale

\*Intervenant

## Peut-on calculer la valeur de paramètres Rock-Eval pour la couche 0–50 cm à partir des valeurs mesurées sur les couches 0–30 et 30–50 cm ?

Eva Kanari <sup>\*1,2</sup>, Pierre Barré <sup>3</sup>, François Baudin <sup>4</sup>, Lauric Cecillon <sup>5</sup>, Florence Savignac <sup>2</sup>,  
Laure Soucemarianadin <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Géologie de l'ENS (LGE) – Ecole Normale Supérieure de Paris - ENS Paris - France

<sup>2</sup> ISTEPI – Sorbonne Universités, UPMC, CNRS – France

<sup>3</sup> Laboratoire de géologie de l'ENS (LGE) – CNRS : UMR8538 – 24 Rue Lhomond 75231 PARIS CEDEX 05, France

<sup>4</sup> Institut des sciences de la Terre de Paris (UMR 7193) – Université Pierre et Marie Curie Paris 6 – France

<sup>5</sup> ECODIV – Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture - IRSTEA (FRANCE) – France

Les sols sont généralement échantillonnés à différentes profondeurs fixes, sous forme de couches, mais ces profondeurs peuvent varier d'une étude à l'autre. Pour calculer des stocks de carbone organique du sol à des profondeurs données, les quantités de COS présentes dans les différents horizons peuvent être additionnées. Nous nous sommes demandés si, de la même manière, il est possible de combiner les valeurs d'indicateurs Rock-Eval mesurées sur différentes profondeurs pour obtenir des valeurs d'indicateurs représentatives des échantillons combinés.

Pour tester la linéarité des indicateurs Rock-Eval, nous avons mélangé des échantillons de sol prélevés en surface (0–30 cm) et en profondeur (30–50 cm) dans les différentes proportions suivantes : 100:0 ; 90:10 ; 75:25 ; 50:50 ; 25:75 ; 10:90 ; 0:100. Ces mélanges ont été réalisés pour 10 sols de forêt française à pédologies contrastées. Nous avons ensuite analysé les échantillons purs (100:0 et 0:100) et les mélanges en Rock-Eval ( $n = 70$  échantillons). Pour différents paramètres Rock-Eval, nous avons comparé les valeurs mesurées pour les différents mélanges aux moyennes pondérées (suivant la composition du mélange) des valeurs mesurées pour les échantillons de surface et de profondeur composant ces mélanges.

Nos résultats montrent que la majorité des paramètres Rock-Eval sont linéaires et qu'il est donc possible de déterminer la valeur du paramètre choisi pour l'horizon 0–50 cm à partir des valeurs mesurées sur les horizons 0–30 cm et 30–50 cm. C'est en particulier le cas pour les paramètres suivants : TOC-RE6, HI, T50CO2pyr et T50CO2ox. Cependant pour deux des paramètres testés (OI et T50CHpyr) la relation entre valeurs mesurées et calculées est peu satisfaisante. Cette mauvaise adéquation est particulièrement observée dans certains types de sol avec des processus pédogénétiques marqués et qui conduisent à des horizons très contrastés. D'autre part, ces deux paramètres sont aussi ceux présentant la plus grande variabilité, ce qui explique au moins en partie les différences entre valeurs mesurées et calculées.

**Mots-Clés:** Analyse Rock Eval 6, COS, additivité des indicateurs RE

Intervenant

## Apport de l'analyse Rock-Eval à la caractérisation du carbone et du soufre dans les sédiments

Violaine Lamoureaux-Var <sup>\*ψ1</sup>, Anabel Aboussou <sup>1</sup>, Daniel Pillot <sup>1</sup>, Isabelle Kowalewski <sup>\*1</sup>,  
Bruno Garcia <sup>1</sup>

<sup>1</sup> IFP Energies nouvelles (IFPEN) - Ministère chargé de l'énergie - France

Un Rock-Eval couplé à un système de mesure du soufre a été développé en vue de caractériser le carbone et le soufre des sédiments. Ainsi, il permet (i) de quantifier les teneurs en carbone et en soufre d'un échantillon de sédiment, (ii) de distinguer quantitativement leur fraction pyrolysable de leur fraction non-pyrolysable dans les conditions analytiques choisies, (iii) d'identifier la présence de matière organique soufrée et le cas échéant d'hydrocarbures soufrés, (iv) d'identifier la présence de phases minérales soufrées. Les résultats obtenus sur diverses roches sédimentaires contenant de la matière organique soufrée, du soufre élémentaire, des sulfures métalliques et/ou des sulfates seront présentés.

Avec cette technique et en l'état actuel des connaissances, quantifier la teneur en soufre de la matière organique distinctement de celle des phases minérales n'est pas encore possible, ou seulement dans certains cas. Au moins deux raisons expliquent cet obstacle : premièrement, chaque phase soufrée, qu'elle soit organique ou inorganique, est décomposée thermiquement par le Rock-Eval sur une gamme de température spécifique, produisant un pic du signal soufre; or certains pics sont superposés empêchant de discerner les phases soufrées d'origine; deuxièmement, certaines phases minérales et organiques du sédiment réagissent chimiquement au cours de la pyrolyse et/ou de la combustion Rock-Eval, formant artificiellement de nouvelles espèces et brouillant ainsi la lecture de la composition du sédiment. Par exemple, la présence de pyrite et/ou de carbonates dans le sédiment perturbe la quantification du soufre de la matière organique pour ces deux raisons.

Une solution est apportée pour s'affranchir du problème dans le cas de roches argileuses riches en matière organique : un modèle a été élaboré pour quantifier la pyrite et la teneur en soufre de la matière organique, à partir des paramètres Rock-Eval tels que les teneurs en soufre total, en soufre pyritique pyrolysable et en carbone minéral, ainsi que les indices d'hydrogène et d'oxygène de la matière organique (Aboussou *et al.*, 2018). L'approche développée ainsi que sa validation seront présentées et discutées.

A. Aboussou, V. Lamoureaux-Var, T. Wagner, D. Pillot, I. Kowalewski, C. März, B. Garcia, B. Doligez, 2018, Pyritic sulphur and organic sulphur quantification in organic rich sediments using Rock-Eval, présenté à la 1<sup>ère</sup> conférence EAGE/IFPEN SRM, juin 2018, Rueil-Malmaison, France.

**Mots-Clés:** 'Rock, Eval', soufre, sédiments, matière organique, pyrite

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: [violaine.lamoureaux-var@ifpen.fr](mailto:violaine.lamoureaux-var@ifpen.fr)

## La pyrolyse Rock-Eval en Sciences du sol

David Sebag <sup>\*1</sup>, Thierry Adatte <sup>2</sup>, Pierre Barré <sup>3</sup>, François Baudin <sup>4</sup>, Lauric Cecillon <sup>5</sup>, Claire Chenu <sup>6</sup>, Thiphaine Chevallier <sup>7</sup>, Stéphanie Grand <sup>2</sup>, Claire Le Bayon <sup>8</sup>, Suzanne Lutfalla <sup>3</sup>, Laure Soucemarianadin <sup>3</sup>, Eric Verrecchia <sup>2</sup>

1 Université de Rouen – Université de Rouen Normandie – France

2 Université de Lausanne (UNIL) – Suisse

3 École normale supérieure [ENS] – France

4 Institut des sciences de la Terre de Paris (UMR 7193) – Université Pierre et Marie Curie Paris 6 – France

5 Centre de Grenoble [IRSTEA] – Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture – France

6 AgroParisTech – INRA - Université Paris-Saclay – France

7 Institut de Recherche pour le Développement (IRD) – : UR198 – France

8 Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie [Neuchâtel] (CHYN) – Suisse

Augmenter les stocks de carbone organique des sols (SOC) pourrait contribuer à atténuer le changement climatique. Inversement, une diminution des stocks de SOC pourrait l'aggraver. Pour pouvoir améliorer les prévisions de l'évolution des stocks de SOC, il est important d'évaluer leur stabilité biogéochimique, ce qui reste à l'heure actuelle une difficulté majeure. Depuis quelques années, plusieurs travaux ont suggéré que les analyses thermiques, et notamment la pyrolyse Rock-Eval, pourraient permettre de mesurer en routine la stabilité biogéochimique du SOC. Cette synthèse vise à faire un état des lieux de l'utilisation de la pyrolyse Rock-Eval en sciences du sol. Cette technique d'analyse thermique, issue de l'exploration pétrolière, a attiré l'attention en raison de sa simplicité et des informations qu'elle délivre, à la fois sur le SOC et le SIC (carbone inorganique des sols). La multiplication des applications et des indicateurs basés sur l'analyse de sols par pyrolyse Rock-Eval nécessite d'en rappeler les atouts, les limites et les perspectives. En outre, certaines questions restent en suspens concernant les protocoles analytiques à privilégier. Après avoir sommairement rappelé les principes de la méthode, nous proposons donc un protocole standard d'acquisition et de traitement des données, puis nous présentons quelques indicateurs clés en sciences du sol à travers quelques exemples d'application. Cette synthèse souligne le potentiel de la pyrolyse Rock-Eval pour mesurer la quantité (concentration) et la qualité (stabilité, composition) du SOC, ce qui ouvre de prometteuses applications dans le cadre de l'initiative internationale 4%o (<https://www.4p1000.org/>) pour suivre de l'augmentation durable des stocks de carbone des sols agricoles et forestiers.

**Mots-Clés:** Matière organique, Sol, Rock, Eval

<sup>\*</sup>Intervenant

## Chemical composition and stability of the particulate organic matter in French forest soils

Laure Soucémaranadin <sup>\*ψ1</sup>, Lauric Cecillon <sup>2</sup>, Claire Chenu <sup>3</sup>, François Baudin <sup>4</sup>, Manuel Nicolas <sup>5</sup>, Cyril Girardin <sup>6</sup>, Pierre Barré <sup>7</sup>

1 Laboratoire de Géologie de l'ENS (LGE) – Ecole Normale Supérieure de Paris - ENS Paris - France

2 Ecosystèmes montagnards (UR EMGR) – Irstea – 2 rue de la Papeterie-BP 76, F-38402 Saint-Martin-d'Hères, France

3 UMR Ecologie Fonctionnelle et Ecotoxicologie des Agroécosystèmes (UMR Ecosys) – AgroParisTech, Institut national de la recherche agronomique (INRA) – AgroParisTech Bâtiment EGER, Campus AgroParisTech Grignon 78850 Thiverval Grignon, France, France

4 Institut des sciences de la Terre de Paris (UMR 7193) – Université Pierre et Marie Curie Paris 6 – France

5 Office National des Forêts - ONF (FRANCE) (ONF) – Office National des Forêts - ONF (FRANCE) – France

6 Ecologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes (ECOSYS) – Institut National de la Recherche Agronomique : UMR1402, AgroParisTech – France

7 Laboratoire de géologie de l'ENS (LGE) – CNRS : UMR8538 – 24 Rue Lhomond 75231 PARIS CEDEX 05, France

In temperate forests, soils contain a significant part of the ecosystem carbon (C) stock that can be subjected to significant C loss upon global change. In forests soils, particulate organic matter (POM) is a major contributor to that labile C pool and its dynamics could thus significantly influence total soil organic C dynamics. The aim of this study is to evidence the driving factors of particulate organic matter (POM) chemistry and thermal stability in French forests. We isolated the POM fraction by size-particle ( $> 50 \mu\text{m}$ ) and density ( $< 1,6 \text{ g cm}^{-3}$ ) in 102 soil samples from 52 French forest sites. These samples presented variability in terms of depth (0–10 cm; 40–80 cm), soil classes (dystric Cambisol; eutric Cambisol; entic Podzol) and vegetation types (deciduous; coniferous). First, we assessed how these different environmental factors influenced POM chemical composition and thermal stability using elemental analysis, mid infrared-attenuated total reflectance (MIR-ATR) spectroscopy and Rock-Eval (RE) thermal analysis. Then, we checked whether or not the results from the three analytical methods were congruent.

Depth, soil class and vegetation type were all important drivers of POM chemistry and stability. Variations in POM chemistry with depth suggested different input sources for the surface and deep soil layers. While POM chemistry and stability were not different in dystric Cambisols and entic Podzols, they tended to differ in eutric Cambisols. POM in deciduous plots had more alkyl C, more carbonyl-C and less aromatic-C and was more thermally stable than the POM found in soils from coniferous plots.

Moreover, results showed an agreement between MIR-ATR-derived ratios of C functions (namely alkyl-C, O-alkyl C, aromatic C and carbonyl C) and RE indices.

This study highlights the variations in POM chemistry existing among soil profiles and that are influenced by depth, soil class and vegetation type. In our study sites, there was no relationship between POM chemistry and dynamics of the very labile C pool, POM chemistry thus appearing decoupled from POM dynamics.

**Mots-Clés:** Rock, Eval 6, soil organic carbon stability, forest soils, particulate organic matter fractionation

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: souce@geologie.ens.fr

## Specifications for carbonate content quantification in recent marine sediments using Rock-Eval pyrolysis

Adrien Wattripont <sup>\*1</sup>, François Baudin <sup>ψ1</sup>, Marc De Rafelis <sup>φ2</sup>, Jean-François Deconinck <sup>§3</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTeP) – Université Pierre et Marie Curie - Paris 6 : UMR7193 – France

<sup>2</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – Observatoire Midi-Pyrénées, Université Paul Sabatier [UPS] - Toulouse III, CNRS : UMR5563, Université Paul Sabatier (UPS) - Toulouse III – Observatoire Midi-Pyrénées 14 Avenue Edouard Belin 31400 Toulouse, France

<sup>3</sup> Université de Bourgogne – Biogéoscience – DIJON, France

Usually, the amount of CaCO<sub>3</sub> in sediments / sedimentary rocks is measured by calcimetry whereas the nature of the carbonates is determined by X-ray diffraction. Recently, a carbonate recognition method based on the Rock-Eval pyrolysis results has been proposed (Pillot et al., 2013). The Rock-Eval pyrolysis is also widely used for the characterization (notably of organic matter) of recent sediments. However, Baudin et al. (2015) questioned the use of this method on recent sediments because some of the characteristics of recent sediments disrupt Rock-Eval analyzes, causing bias in interpretations.

In this study, the thermal stability of fossil and recent marine carbonated sediments is analyzed in order to prove the fundamental differences occurring in carbonate decomposition and support the importance of their consideration in a Rock-Eval analysis. The state of calcite preservation in marine recent sediments and sedimentary rocks was studied between 400°C and 600°C using different characterization techniques (calcimetry, XRD, SEM imaging, etc.) for a better interpretation of data obtained by the Rock-Eval. Our results highlight an obvious difference of calcite decomposition temperature range during Rock-Eval analysis: between 550°C and 775°C for bulk clayey hemipelagic sediments against 550°C to 840°C after rinsing the same sediments to eliminate salt. Indeed, during heating, water and hydroxide anions are released from clay minerals and reacts with salt crystals to form acid vapors. These acid vapors react with carbonates and generate CO<sub>2</sub>. This carbonate chemical decomposition starts at lower temperatures compared to their typical temperature of thermal decomposition leading to an overestimation of mineral carbon and underestimation of organic carbon by the Rock-Eval method. In absence of clay minerals, this effect is not evidenced in recent marine pure carbonate oozes. It is therefore essential to prepare and rinse the recent clay-rich carbonated sediment samples before Rock-Eval analysis to avoid any misleading in their interpretation.

**Mots-Clés:** recent sediments, carbonates, rock eval, clays, salt, chemical decomposition

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: francois.baudin@upmc.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: marc.derafelis@get.omp.eu

<sup>§</sup>Auteur correspondant: Jean-François.Deconinck@u-bourgogne.fr



## 14. RESSOURCES



## 14.1. Géomatériaux : de l'extraction à la conservation/valorisation

## L'intérêt des géotextiles dans la substitution des sables dans les petits barrages et retenues collinaires – cas des petits barrages en Algérie.

Bachir Benlaoukli <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> MVRE (ENSH) - ENSH BLIDA ALGERIE, Algérie

L'Algérie vit actuellement un pillage sans précédent des sables des lits d'oueds dont la destination est orientée vers les travaux de construction y compris la réalisation des barrages. L'utilisation du sable pour filtres et drains engendre des situations dangereuses lorsque les normes et les exigences de dimensionnement ne sont pas respectées, car un sable non conforme techniquement engendre des érosions internes et des colmatages du filtre pouvant entraîner la ruine de l'ouvrage.

Dans la construction des barrages en matériaux locaux le rôle des sables réside dans la réalisation des filtres de transition et de drains.

Contrairement aux sables naturels provenant des lits d'oueds, les sables artificiels sont le produit du concassage dans les carrières. Ces deux types pouvant faire l'objet d'une partie des organes de filtration sont assujettis à un calcul hydraulique.

L'extraction des sables naturels pose des problèmes graves à l'écologie et à l'environnement. En effet cette extraction modifie la topographie du cours d'eau engendrant ainsi une modification du régime d'écoulement, et de ce fait pouvant mener des catastrophes naturelles telles que les inondations des parcelles riveraines, des débordements à proximité des habitations et des biens immobiliers, les assèchements sont aussi évident à certains endroits du cours d'eau perturbant ainsi l'écosystème.

Aujourd'hui pour éviter l'utilisation des sables dans la réalisation des filtres on fait substituer ces derniers par un matériau synthétique en l'occurrence le géotextile.

Certes le géotextile est un matériau géosynthétique non biodégradable, et d'ailleurs c'est ce que nous souhaitons, car la durée de vie de l'ouvrage peut s'étaler sur plusieurs dizaines d'années. Ajouté à cela ce matériau géosynthétique est facile mettre en place dans le corps de la digue pour jouer son rôle de filtre. En plus le géotextile est moins coûteux que le sable au vu de leur prix unitaire y compris la mise en œuvre.

Dans notre communication nous mettrons en évidence les endroits qu'occuperaient le géotextile dans le massif du remblai.

**Mots-Clés:** géotextiles, filtres, digue, sables, barrage, retenue collinaire

\*Intervenant

## L'intérêt des essais de vieillissement accéléré sur la roche dans le choix des enrochements des barrages en terre. Cas des rip-rap des retenues collinaires en Algérie

Bachir Benlaoukli <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> MVRE (ENSH) - ENSH BLIDA ALGERIE, Algérie

La roche existe en quantité et en qualité dans presque la totalité du territoire de l'Algérie. Dans la construction des barrages en remblai compacté, la roche est très utilisée, et les roches les plus prisées sont les basaltes les granites, les Gneiss, et parfois certains calcaires saints. On fait recours à la roche pour le revêtement des talus amont contre le batillage des vagues, et dans les drains prisme au pied du barrage. Dans le monde un nombre considérable de barrages est édifié en enrochements auxquels on associe un organe d'étanchéité dans son corps, afin d'assurer la rétention d'eau à l'amont. La vulgarisation des aptitudes dimensionnelles, et l'identification des qualités d'une roche peuvent parfois nécessiter des moyens et des essais relativement coûteux comparativement aux essais sur les sols meubles.

Pour les roches destinées aux remblais il est impératif connaître le degré d'altérabilité lorsque celles-ci se trouvent dans un milieu caractérisé par des changements climatiques brutaux, et des conditions atmosphériques extrêmes. Aujourd'hui la meilleure façon de définir l'altérabilité des roches, c'est de recourir aux essais de vieillissement accéléré, tel que le gel-dégel, chaud-froid, mouillage-séchage qui peuvent être réalisés dans une durée de 3 mois tout au plus, car la roche est inévitablement sur le talus amont exposée beaucoup plus au mouillage-séchage du fait des fluctuations des niveaux d'eau dans le lac. Le passage extrême de l'état immergé à l'état de séchage peut affecter sensiblement la résistance, et la dureté des enrochements du moins pour certains types de roches. Exposée à la chaleur torride du jour, et à la fraîcheur souvent trop basse la nuit, comme c'est le cas sur les hauts plateaux, la roche se comporte probablement différemment. Dans les régions arides du pays comme c'est le cas au Sahara, la roche subit une chaleur dans la journée atteignant les 50°, et un froid la nuit allant jusqu'à -7°. À l'intérieur du pays, de novembre à mars la roche subit le gel partir de 17heures et le dégel partir de 10heures en hivers.

A l'aide des protocoles mis en place, on peut aisément entreprendre des essais de vieillissement accéléré au laboratoire pour trancher quant à l'utilisation de ce matériau naturel économiquement accessible et écologique dans son utilisation.

**Mots-Clés:** roche, enrochements, sol meubles, barrage, talus, revêtement

\*Intervenant

## Nouvelle méthode de préparation par rodage de sections polies de matériaux minéraux sensibles à l'eau

Fouad Amin <sup>\*ψ1</sup>, Philippe Le Coustumer <sup>φ2</sup>, Jean-Jacques Raux <sup>§3</sup>, Gilles Charlier <sup>¶3</sup>,  
Arnaud Gauthier <sup>4</sup>, Michel Dubois <sup>\*\*4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Lithopréparation – PETROLAB SAS – France

<sup>2</sup> Géoressources Environnement – Université Michel de Montaigne - Bordeaux III : EA4592 – Pessac, France

<sup>3</sup> BROTLAB – AERI SAS – France

<sup>4</sup> Laboratoire de Génie-Civil et géo-Environnement (LGCgE) – Université de Lille - Sciences et Technologies – France

L'objet de cette étude est de tester une nouvelle méthode de fabrication de sections polies par rodage utilisant une rodeuse comportant deux alimentations distinctes en abrasifs. Un des principaux caractères novateurs réside dans le fait que cette rodeuse réalise, en plus des lames minces, des sections polies de qualité bien supérieure à ce qui se fait actuellement avec des polisseuses automatiques utilisant des disques diamantés. En effet, le procédé de rodage développé génère moins de contraintes sur l'échantillon et permet ainsi d'obtenir une section polie prête à être analysée en seulement deux étapes. Ceci permet donc un gain de temps considérable, ainsi qu'une réduction drastique des consommables utilisés. Ceux-ci sont à base de corps gras anhydres et de poudres abrasives (carbure de silicium ou oxyde d'aluminium) de  $6,5\mu\text{m}$  à  $1\mu\text{m}$  de granulométrie. Les échantillons retenus dans le cadre cette étude sont des matériaux sensibles à la présence d'eau : matériaux cimentaires, roches salines, argiles, minéraux et météorites. Cette nouvelle technique de rodage permet ainsi d'observer et d'analyser la microstructure des matériaux sans la modifier ou l'altérer en éliminant les processus de dissolution et/ou d'hydratation de phases réactives.

Ainsi, dans le cas du béton, les observations en microscopie électronique à balayage montrent que la microstructure de la matrice n'a pas été altérée lors du rodage : les minéraux anhydres résiduels du clinker ne se sont en effet pas hydratés. Il est dès lors possible de suivre les cinétiques d'hydratation du ciment.

Dans le cas des clinkers et des ciments, le procédé développé permet d'obtenir une section polie 100% anhydre. Il devient alors possible d'accéder aux propriétés physico-chimiques suivantes : porosité, pourcentage des constituants; granulométrie; morphologie et composition chimique...

Ces éléments d'ordre microstructural sont fondamentaux pour le diagnostique du process de cuisson du clinker et du broyage du ciment.

Ces premiers résultats montrent ainsi qu'il est possible au travers d'un partenariat entre un industriel de fabrication de machines, un laboratoire privé de fabrication de lames minces et sections polies et des laboratoires universitaires de mettre au point et valider des méthodes de préparations d'échantillons sans altération de ceux-ci comme c'est souvent le cas avec les procédés de polissage utilisant des polisseuses automatiques.

**Mots-Clés:** Préparation d'échantillons, lames minces, sections polies, rodage, matériaux cimentaires, roches sensibles à la présence d'eau, microstructure

## Restaurer le patrimoine bâti. Caractérisation des pierres de taille anciennes et actuelles employées dans le département des Ardennes

Gilles Fronteau <sup>\*ψ1</sup>, Norman Lelarge <sup>1</sup>, Céline Thomachot-Schneider <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Groupe d'Étude sur les Géomatériaux et Environnements Naturels Anthropiques et Archéologiques (EA3795, GEGENAA (URCA)) - Université de Reims - Champagne Ardenne : EA3795 – France

Le département des Ardennes (Grand-Est, France) est composé au nord par une partie du Massif ardennais, comprenant des schistes, quartzites et calcaires du Paléozoïque et au sud par les différentes auréoles mésozoïques du Bassin parisien, qui définissent les micro-régions des Crêtes pré-ardennaises, de la Champagne humide ou de la Champagne crayeuse comprenant essentiellement des calcaires dont la craie mais aussi des sables, argiles et marnes.

A partir d'une série d'inventaires, d'atlas et cartes géologiques du XVIII et XIX<sup>e</sup> siècle, la constitution d'une base de données, analysée via un système d'information géographique (SIG), permet de mieux visualiser la diversité des ressources géologiques disponibles localement. L'indexation des âges stratigraphiques (précision à l'étage) et des différents emplois supposés des matériaux extraits (pierres pour l'empierrement, moellon, pierre de taille, pierres à chaux...) autorise l'interrogation multicritères de la base de données et la création de cartes thématiques. Les différentes cartes obtenues permettent une approche diachronique de l'histoire extractive du département au cours de l'époque contemporaine et jusqu'à nos jours. Une mise en relation avec les matériaux reconnus dans le bâti, avec les cartes actuelles ou les photos aériennes permet de reconnaître les aires d'influences des différents districts ; de définir les aires de diffusion des géomatériaux et l'évolution précise de certaines carrières ou gisements.

L'analyse comparative avec les pierres des monuments ardennais apporte un éclairage nouveau sur la connaissance des pierres de ce département. Elle permet de remettre en lumière les importants districts carriers qui existaient au sein des couches jurassiques, fréquemment mésestimés au profit de ceux des départements voisins, ce qui pose des problèmes évidents en termes de conservation du patrimoine bâti.

Un focus tout particulier sera fait sur les initiatives récentes d'ouvertures de micro-carrières, par exemple à Hannogne-Saint-Martin et à Dom-le-Mesnil qui tentent de relancer la filière de la pierre ardennaise et de pallier en partie au manque criant de matériaux locaux pour la restauration du patrimoine bâti.

**Mots-Clés:** géomatériaux, pierre de taille, ardennes, patrimoine bâti, carrières

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: [gilles.fronteau@univ-reims.fr](mailto:gilles.fronteau@univ-reims.fr)

## Nouvelle méthode d'élaboration de sections polies et lames minces de matériaux cimentaires frais : préservation des caractéristiques microstructurales

Fouad Amin <sup>\*ψ1</sup>, Philippe Le Coustumer <sup>φ2</sup>, Bernard Martin <sup>§2</sup>, Arnaud Gauthier <sup>¶3</sup>,  
Michel Dubois <sup>Ľ3</sup>, Jean-Jacques Raux <sup>\*,\*\*4</sup>, Gilles Charlier <sup>ψ/4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Lithopréparation - PETROLAB SAS - France

<sup>2</sup> Géoressources et Environnement - Université de Bordeaux - France

<sup>3</sup> Laboratoire de Génie-Civil et géo-Environnement (LGCgE) - Université de Lille - Sciences et Technologies - France

<sup>4</sup> BROTLAB - AERI SAS - France

Ce travail présente une nouvelle technique développée pour réaliser des sections polies et des lames minces de matériaux cimentaires à l'état frais. Cette technique repose sur un échange de l'eau présente dans le matériau par de l'acétone. Elle permet ainsi de stopper l'hydratation tout en figeant l'organisation de la microstructure du matériau cimentaire à différents stades d'hydratation. La technique a été employée d'abord par les pédologues pour caractériser l'espace poral structural des sols humides, puis par les géologues pour étudier la microstructure des sédiments prélevés par carottage dans les fonds marins.

Le procédé de préparation consiste à couler le matériau cimentaire en sortie du malaxeur dans une boîte en aluminium perforée de dimensions 100mm x 45 mm x 13 mm. Immédiatement l'échantillon est immergé dans une solution d'eau et d'acétone afin de réaliser l'étape de déshydratation. L'eau est ensuite évacuée au moyen d'une pompe péristaltique qui permet une circulation continue de l'acétone au travers d'un tamis moléculaire. Après un échange total de l'eau par l'acétone au bout de 72 heures, l'échantillon est placé dans une boîte contenant la solution d'imprégnation composée d'une résine époxy, du catalyseur et de l'acétone. Un pigment fluorescent est également ajouté au mélange pour permettre des examens sous lumière UV. Ensuite la boîte plastique contenant l'échantillon est placée dans un dessiccateur maintenu sous vide durant 72 heures. A la fin de cette dernière étape, l'échantillon est retiré du dessiccateur et laissé à température ambiante pour polymérisation et durcissement. Le matériau ainsi induré peut subir les mêmes opérations classiques (sciage, amincissement, polissage...) de préparation de sections polies ou de lames minces de matériaux minéraux très sensibles à la présence d'eau.

Cette technique appliquée aux matériaux cimentaires frais permet d'observer et d'analyser la microstructure de pâte de ciment et de mortier à différentes échelles par scanner, stéréo microscope, microscope optique, microscope électronique... De plus ces observations peuvent être réalisées sur des sections polies ou sur des lames minces de différentes dimensions. Les premières observations microstructurales au Microscope Electronique à Balayage montrent clairement un blocage des processus d'hydratation de la pâte de ciment et donc un gain en matière de caractérisation des phases réactives anhydres (C3S, C2S, C3A, C4AF) du ciment et des additions cimentaires (laitier, cendres volantes...).

Ce procédé ouvre de nouvelles perspectives pour étudier l'influence des adjuvants et des ajouts sur la microstructure des matériaux cimentaires au cours de l'hydratation.

**Mots-Clés:** Préparation d'échantillons, lames minces, sections polies, échange eau/acétone, matéri- aux cimentaires frais, microstructure

## Problématique de compatibilité des pierres en œuvre sur le bâti, entre pierres d'origine et pierres de restauration

Céline Thomachot-Schneider <sup>\*ψ1</sup>, Gilles Fronteau <sup>1</sup>, Maxime Gommeaux <sup>1</sup>, Stéphanie Eyssautier <sup>1</sup>,  
Patricia Vazquez <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Groupe d'étude des Géomatériaux et Environnements Naturels, Anthropiques et Archéologiques (GEGENAA EA 3795) - Université de Reims Champagne-Ardenne : EA3795, Université de Reims - Champagne Ardenne : EA3795 – France

La fermeture progressive des carrières de pierre de taille approvisionnant les monuments est un des facteurs qui a conduit les acteurs du patrimoine à utiliser des pierres de remplacement issues de source locale, régionale ou extrarégionale et parfois même à fabriquer de fausses pierres à partir de débris de pierres naturelles mis en forme par des liants. C'est le cas notamment pour les monuments de Reims et ses environs pour lesquels la dernière carrière en activité exploitant les calcaires du Lutétien, dont la " Pierre de Courville ", utilisés depuis l'époque Gallo-romaine, a fermé en 2005. Parmi les pierres de remplacement, on trouve le calcaire du Tithonien appelé " Pierre de Savonnières " ainsi que les calcaires lutétiens de l'Oise. De la même façon, dans la région Centre-Val de Loire, la pierre d'origine, les calcaires du turonien appelés " Tuffeau ", largement utilisés pour la construction de tous les châteaux de la Loire, côtoient désormais des calcaires du même âge appelé " Pierre de Richemont ". En Belgique, pour la reconstruction de l'Abbaye d'Orval, le manque de pierre naturelle d'origine associé à des soucis d'économies a été pallié par la fabrication d'une pierre reconstituée à partir de débris des deux calcaires bajocien et sinémurien d'origine. Outre la compatibilité esthétique indispensable à l'utilisation d'un matériau de remplacement, la compatibilité en termes de propriétés hydrauliques est essentielle. Dans les cas qui sont présentés, les porosités et distribution du réseau poreux sont différentes entre la pierre d'origine et la pierre de remplacement. La juxtaposition de blocs ayant des propriétés de transfert différentes rompt la continuité hydrique dans l'ensemble du bâti et peut contribuer à l'accélération de l'altération des blocs de pierre d'origine attenants. Dans le cas de la pierre reconstituée, la mauvaise qualité du liant, initialement riche en sulfates, vient s'ajouter à ses caractéristiques pétrophysiques et expliquer ses différences de comportement en place.

**Mots-Clés:** Pierres en oeuvre, compatibilité, propriétés hydrauliques, réseau poreux, patrimoine

Intervenant

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: celine.schneider@univ-reims.fr

## Etude de l'effet thermique sur les matériaux de la basilique Saint Remi de Reims : tests de vieillissement en laboratoire

Emilie Huby <sup>\*ψ1</sup>, Céline Thomachot-Schneider <sup>1</sup>, Gilles Fronteau <sup>1</sup>, Patricia Vazquez <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Groupe d'Étude sur les Géomatériaux et Environnements Naturels, Anthropiques et Archéologiques - EA 3795 (GEGENAA) – Université de Reims Champagne-Ardenne : EA3795 – France

Les monuments historiques sont soumis à différents facteurs d'altération au cours du temps qui affectent le comportement de la pierre. Des contraintes répétées causées par des variations de température et d'humidité peuvent être dommageables pour le matériau, l'altération dépendra de l'intensité de ces variations et des propriétés de la roche. C'est le cas pour la basilique St-Remi de Reims, classée au patrimoine mondial de l'UNESCO.

Du fait de son histoire, ce monument est constitué d'un ensemble de matériaux hétérogènes aux propriétés variées, dont une grande partie des éléments a été modifiée, ajoutée, restaurée ou reconstruite. Parmi ces matériaux, deux types de calcaires typiques et un mortier de restauration sont étudiés en laboratoire : les pierres du type Courville, calcaire du Lutétien considéré comme pierre d'origine présentant fréquemment des desquamatations, les pierres du type Savonnières, calcaire du Jurassique importé pour la restauration et le mortier Lithomex, utilisé sur la basilique.

Pour cette étude, un suivi microclimatique a été mis en place sur la Basilique en décembre 2017, il s'agit d'un réseau de capteurs enregistrant des données de température et d'humidité à différentes altitudes et sous différentes expositions. L'analyse des données obtenues avec le suivi *in situ* permet d'établir des tests pertinents par rapport aux contraintes de l'environnement de la roche.

L'impact des variations climatiques réelles sur l'altération des pierres est ainsi étudiée en simulant le vieillissement accéléré d'une façade : des cycles d'imbibition/séchage pour les périodes humides/ensoleillées, des cycles gel/dégel pour les basses températures sous condition humide et des tests de fatigue thermique pour les contraintes causées par les changements rapides d'ensoleillement. Pour ce faire, un échantillon prismatique (10 x 4,5 x 5cm) est placé dans une gaine isolante en polystyrène. L'approvisionnement en eau se fait par imbibition à la base de l'échantillon sec ou préalablement saturé, les variations de température sont simulées par une platine en contact avec une des faces ou par une lampe infrarouge. La déformation du matériau et la température dans l'échantillon sont mesurées respectivement par des jauge de contrainte et des thermocouples.

La combinaison du suivi *in situ* et de ces tests de vieillissement en laboratoire sur différents matériaux de la Basilique St-Remi permettront d'identifier des zones à risque et de modéliser une carte des altérations.

**Mots-Clés:** Contrainte thermique, Dilatation/contraction thermique, Suivi climatique, Calcaire, Altération des roches, Patrimoine bâti, Basilique Saint, Remi

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: emilie.huby@univ-reims.fr

## Impact de la valorisation énergétique de déchets dans les fours de cimenteries sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques du ciment produit

Fouad Amin <sup>\*ψ1</sup>, Philippe Le Coustumer <sup>φ2</sup>, Arnaud Gauthier <sup>§3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Minéralogie et Pétrographie – PETROLAB SAS – France

<sup>2</sup> Georessources et Environnement – Université de Bordeaux (Bordeaux, France) – France

<sup>3</sup> Laboratoire de Génie-Civil et géo-Environnement (LGCgE) – Université de Lille - Sciences et Technologies – France

Afin de pallier les forts besoins énergétiques, les cimenteries utilisent couramment des combustibles de substitution dans leurs fours rotatifs. Divers types de déchets (pneus et huiles usagés, sciures imprégnées d'huiles et de solvants, farines animales, boues de stations d'épuration...) sont ainsi valorisés en tant que combustibles. Leur incinération apporte des éléments mineurs et traces, pouvant affecter les réactions de formation des minéraux du clinker et par conséquent leurs réactions d'hydratation ainsi la résistance mécanique des liants hydrauliques produits. Le but de cette étude est d'évaluer l'impact des éléments traces mineurs (phosphore, zinc, cuivre) apportés par la co-incinération de déchets sur la minéralogie des phases du clinker et sur l'hydratation et la résistance mécanique du ciment obtenu à partir de ce clinker cuit avec des déchets.

Trois matériaux ont été étudiés : un clinker (témoin) cuit avec un combustible traditionnel (charbon, coke de pétrole), un second cuit avec un mélange combustible traditionnel et boue de STEP (B.STEP) et enfin un troisième clinker cuit avec un combustible traditionnel et farines animales (FA).

Les analyses chimiques élémentaires par fluorescence X et ICP-AES, minéralogiques par Diffraction des Rayons X et Analyse Thermique Gravimétrique ainsi que microstructurales par Microscopie Electronique à Balayage (MEB) et microsonde de Castaing, mettent en évidence un enrichissement notable en P dans la Bélite ainsi que dans la phase aluminate des clinkers cuits avec FA ou B.STEP. Aucune croissance de nouvelles phases minéralogiques n'a en outre été détectée.

Les essais de résistance mécanique du ciment mettent en évidence un comportement très différent à 20°C et 60°C. Cette différence pourrait s'expliquer par l'activation thermique de la dissolution de la Bélite à 60°C qui augmenterait la libération de P2O5 dans le milieu. Celui-ci précipiterait alors en tant qu'hydroxyapatite en substitution d'une partie de la portlandite. Cette réaction peut réduire la croissance et la quantité de CSH. En conséquence, le développement de la résistance mécanique après un cycle d'étuvage pour le ciment riche en P2O5 peut être affecté.

**Mots-Clés:** Valorisation énergétique de déchets, farines animales, boues de STEP, four de cimenterie, production de ciment, caractérisations physico, chimiques, essais mécaniques

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: docteur.amin@gmail.com

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: plc@lnet.fr

<sup>§</sup>Auteur correspondant: Arnaud.Gauthier@univ-lille1.fr

## La France et ses ciments : aperçu historique, géologique et méthodologique

Vincent Thiery \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai (IMT Lille Douai) – CS 10838, 59508 Douai Cédex – France

Du pont du Gard (1er siècle de notre ère), construit en maçonnerie à base d'un mortier de chaux mélangée à de la brique pilée, au MuCEM de Marseille (2103) dont la structure légère et ajourée est possible grâce à l'emploi de béton fibré à ultra haute performance, la France a été le théâtre d'innovations dans le domaine des liants notamment grâce à sa géologie.

En première approximation, on peut tout simplement décrire un ciment comme le produit résultant de la cuisson d'une roche, ou d'un mélange de roches, dans le but de les rendre sensibles à l'eau de manière à ce que ce ciment fasse prise : on parle alors d'un liant hydraulique. Il existe de nombreux types de ciments, ayant chacun leurs applications et procédés de fabrication.

D'illustres chimistes et géologues se sont intéressés très tôt aux matériaux de construction, d'une part afin de retrouver le savoir-faire romain perdu au cours du moyen-âge, d'autre part afin de comprendre le phénomène de prise des ciments.

Ainsi, Barthélémi Faujas-de-Saint-Fond (1741-1819), dans son ouvrage " recherches sur les volcans éteints du Vivarais et du Velay ", s'intéresse à la pouzzolane, à son rôle dans les liants et au moyen d'utiliser des pouzzolanes artificielles ayant les mêmes propriétés. Encore aujourd'hui, le terme pouzzolane est fondamental en chimie du ciment, la réaction pouzzolanique étant la prie d'un matériau en présence d'eau et de chaux.

C'est le chimiste Louis Vicat (1786-1861) qui a inventé le ciment tel que nous le connaissons aujourd'hui en 1817. Jeune ingénieur des ponts et chaussées en charge de la construction du pont de Souillac sur la Dordogne, ses travaux de cuisson de différents calcaires et argiles lui ont permis de comprendre l'importance de la matière première pour l'obtention d'un ciment faisant prise.

La bauxite, décrite en 1821 par le minéralogiste Pierre Berthier dans des échantillons provenant des Baux-de-Provence, est devenue par la suite un composant majeur des ciments d'aluminates de calcium, brevetés en 1908 par la compagnie Lafarge.

Le ciment naturel, également improprement dénommé ciment romain (de nos jours commercialisé par Vicat sous la dénomination Ciment Prompt), fut inventé en Angleterre en 1796. De nos jours il ne subsiste qu'une usine dans le massif de la Chartreuse, mais ce ciment fut fabriqué notamment en Bourgogne (ciment de Vassy) et dans la région de Marseille grâce à la présence de calcaires de composition chimique adéquate.

Dans le domaine de la méthodologie d'étude des ciments, il est important de noter que c'est le chimiste Henry le Chatelier (1850-1936) qui a le premier étudié et décrit (1882) le clinker Portland en lame mince, avec une précision d'observation identique à ce que l'on peut faire actuellement. Il a également observé l'hydratation du ciment sous le microscope.

On le voit, les matériaux cimentaires sont intimement liés à la géologie tant au niveau des matières premières qu'au niveau des techniques analytiques, et ce depuis plusieurs siècles.

**Mots-Clés:** ciment, histoire des sciences, géomatériaux

## Apport de l'étude minéralogique, géochimique et géotechnique pour la caractérisation des sables de la région de Meknès (Maroc)

Hicham Benbaqqal \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Aissa Masrour - Maroc

La région de Meknès se présente sous forme d'un plateau constitué d'une couverture de marnes, de sables fauves et de calcaires lacustres, d'âge mio-pliocène. Les bordures de ce plateau sont composées des calcaires dolomitiques et des marnes d'âge jurassique. La demande accrue en matériaux de construction avait pour conséquence une surexploitation excessive et non contrôlée des carrières. Ce problème nécessite une étude rationnelle de la qualité des matériaux, pour orienter les entrepreneurs aux carrières répondant aux qualités exigées définies par les normes du domaine des bâtiments et des travaux publics (BTP). Pour atteindre cet objectif, des analyses minéralogiques et géochimiques par diffraction aux rayons X et par l'ICP-AES ont été réalisées sur des échantillons pris de quatre carrières. En outre, les paramètres physiques et mécaniques des matériaux sont mesurés selon les protocoles géotechniques fondamentaux sous forme d'essais expérimentaux. Les analyses minéralogiques ont montré, une dominance du quartz et des minéraux opaques, avec présence des oxydes de fer pour les sables fauves et de la calcite et du quartz pour les sables dolomitiques. Les analyses géochimiques présentent des proportions importantes en SiO<sub>2</sub>, CaO et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ce dernier altère le mortier de béton et diminue sa densité. Les teneurs en et en ne présentent aucun risque de corrosion des aciers, ou de générer des phénomènes de dégradations du matériau. La distribution granulométrique montre une asymétrie positive pour les sables fauves et une asymétrie négative pour les sables dolomitiques. Les caractéristiques physiques et mécaniques ont révélé que les sables dolomitiques présentent une bonne propreté, une friabilité moyenne par rapport aux sables fauves. Ces résultats d'analyses ont permis de classer, spatialement, les sables fauves comme des sables argileux (Sb - SA), destinés aux bétons de type B5. Par contre, les sables dolomitiques sont des sables limoneux (Sb - SL), destinés aux bétons de type B3 et B4.

**Mots-Clés:** Sables, BTP, minéralogie, géochimie, géotechnique, géomatériaux, Meknès.

\*Intervenant

## Composition and porosity study of original and restoration materials included in a coastal historical construction

Hector Morillas<sup>\*1</sup>, Patricia Vazquez<sup>ψ2</sup>, Marcaida Iker<sup>φ1</sup>, Maite Maguregui<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU) - Espagne

<sup>2</sup> Groupe d'Étude sur les Géomatériaux et Environnements Naturels, Anthropiques et Archéologiques - EA 3795 (GEGENAA) - Université de Reims Champagne-Ardenne : EA3795 - France

The materials used for the building constructions can suffer during their life numerous deterioration processes induced by different anthropogenic and natural factors. For this reason, optimal restoration works are vitally necessary for a correct Built Heritage preservation process. One of the most critical environment is the marine atmosphere (marine aerosol impact following dry and wet depositions) where the climatic conditions are very aggressive. For this reason, the new building materials that will be used for a restoration must be selected taking into account the possible deterioration sources that are present in the vicinity of the building or construction. This work is focused on the analytical and physical study of the different building materials used for the restoration works carried out in 2014 in the Tower of La Galea Fortress (Getxo, Basque Country, Spain), a historical construction placed in front of the sea. The analyzed materials were the weathered sandstone (original sandstone) and the one used to replace it (restoration sandstone), as well as restoration joint and rendering mortars. The results presented in this work offered a global idea of the correct material selection, taking into account the different factors that can affect the integrity of the whole building in the future. In order to test the durability of these materials against the surrounding environment, different analyses were carried out. On the one hand, X-ray Diffraction (XRD), Raman spectroscopy and Wavelength Dispersive X-ray fluorescence (WD-XRF) were used for chemical characterization of the materials. On the other hand, Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) was used to understand the porous system and the thermal behavior was studied using Infrared Thermography (IRT). Finally, the thermal fatigue test was carried out to determine if temperature cycles could have impact in the structural integrity and aesthetic appearance (i.e. color changes) of these materials during time. As example, thanks to the Raman spectroscopy, the new used restoration materials present a homogeneous distribution. Regarding the physical properties, it was possible to determine that the rendering mortar used in the restoration works have micropores < 0.1 mm, making this material more porous. On the contrary, both sandstones (original and restoration material) showed pores < 5 mm, revealing that these materials can have higher permeability and ability to accumulate water.

**Mots-Clés:** Sandstone, Raman spectroscopy, X, ray Diffraction, Restoration, Infrared thermography, Marine aerosol.

<sup>ψ</sup>Intervenant

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: hector.morillas@ehu.eus

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: iker.marcaida@ehu.eus

## Méthode d'analyse non destructive du bâti et de ses matériaux, appliquée à quelques monuments d'Aquitaine médiévale : de l'acquisition à la valorisation

Estelle Chargé <sup>\*ψ1,2</sup>, Jean-Baptiste Javel <sup>\*φ2</sup>, Florent Comte <sup>3</sup>, Clément Coutelier <sup>3</sup>, Pierre Guibert <sup>2</sup>, Christian Gensbeitel <sup>2</sup>, Quitterie Cazes <sup>1</sup>

<sup>1</sup> France, Amériques, Espagne – Sociétés, pouvoirs, acteurs (FRAMESPA) – Université Toulouse - Jean Jaurès, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5136 – France

<sup>2</sup> Institut de Recherches sur les Archéomatériaux (IRAMAT-CRP2A) – université Bordeaux Montaigne : UMR5060, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5060 – France

<sup>3</sup> Ausonius-Institut de recherche sur l'Antiquité et le Moyen âge – université Bordeaux Montaigne, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5607, LaScArBX – France

Idéalement, les études d'archéologie du bâti s'intègrent au sein de projet de restauration des édifices, en amont et pendant les travaux. Ce suivi archéologique des bâtiments offre la possibilité d'étudier l'ensemble de l'élévation, notamment grâce à la présence d'échafaudage. Cependant, dans de nombreux cas nous intervenons sur des sites ne réunissant pas ces conditions et amenant leur lot de contraintes : impossibilité de prélèvement, difficulté d'observation des différentes parties de l'édifice – aussi bien lié à l'accessibilité qu'aux restaurations antérieures – ; ce à quoi s'ajoute un budget souvent limité.

Aujourd'hui, différents outils d'acquisition et de traitement des données permettent de s'adapter à ces contraintes, principalement en couplant la topographie à la photographie. L'acquisition de modèles en trois dimensions, géoréférencés, issus d'une couverture photographique associant différents points de vue, offre aussi bien la possibilité d'un relevé global des élévations (orthophotographie, Dessin Assisté par Ordinateur) qu'une observation fine des complexes ornementaux (sculpture, peinture) et des gestes des bâtisseurs (métrologie, tracéologie). De même, l'étude des liants architecturaux et des composants des maçonneries permettent une meilleure compréhension de la chronologie des chantiers et des logiques d'approvisionnement. Par exemple, l'analyse des mortiers de chaux passe par un échantillonnage systématique afin d'assurer la représentativité des observations requise par la pétrographie ou la granulométrie. Si l'on ne peut se détacher complètement de cette phase destructive, il est aujourd'hui possible de la minimiser et de compléter les données grâce à la microphotographie.

Les données issues de ces différentes techniques fondent l'analyse, mais prennent également en considération les problématiques de conservation, de valorisation et de médiation du patrimoine. Les modèles et outils mis en place sont modulables et exploitables par tous les acteurs de la vie du monument, selon les attentes de diffusion.

**Mots-Clés:** archéologie, archéométrie, patrimoine, bâti, matériaux de construction, analyse non invasive, valorisation

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: charge.estelle@yahoo.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: jean-baptiste.javel@u-bordeaux-montaigne.fr

## Développement d'un mortier à base de la cendre volante de papetière et du laitier de haut fourneau en remplacement du ciment jusqu'à 95%

Sahar Seifi <sup>\*ψ1,2</sup>, Sahar Sebaibi <sup>1</sup>, Daniel Levacher <sup>2</sup>, Mohamed Boutouil <sup>1</sup>

<sup>1</sup> ESITC Caen – COMUE Normandie Université – France

<sup>2</sup> Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C) – Normandie Univ, UNICAEN, UMR CNRS 6143 – France

Ces dernières années, les innovations dans l'industrie de la construction ont été nombreuses. L'utilisation de déchets tels que les cendres volantes papetières et les laitiers moulus est connue comme un remplaceant partiel du ciment dans ce domaine.

Les cendres volantes papetières (CVP) sont des résidus qui proviennent de la combustion des boues de papier générées par l'industrie du papier. Le laitier également est un matériau secondaire issu de la fabrication de la fonte pendant laquelle le minerai de fer et le fondant sont portés à haute température dans un haut-fourneau. Les deux matériaux contiennent environ de 20% de SiO<sub>2</sub> et 50% de CaO dans leur composition chimique qui sont très proches de celle du ciment et encouragent les propriétés pouzzolaniques en l'absence de ciment.

Cette étude a pour objectif de remplacer partiellement des constituants de matériaux classiques par des déchets dans l'intérêt de les utiliser dans le domaine de la construction notamment pour la fabrication des mortiers

Les mélanges à partir de 73% CVP et de 27% de laitier moulu ont fabriqué et basés sur la formulation basique d'un mortier. Un mixe de CVP et du laitier a remplacé une fois 90% du ciment et une fois 95% du ciment dans la formulation d'un mortier normal. L'effet d'ajout de deux types d'activateurs a été également vérifié ; chloride de calcium et silicate de sodium.

Les échantillons prismatiques de dimension 4 x 4 x 16 cm<sup>3</sup> ont soumis à l'essai de flexion et en suite la compression après avoir passé 2, 7 et 28 jours de cure. Une résistance maximale de 15 MPa a été obtenu pour des mélange en remplaçant 95% du ciment et 17 MPa pour 90% remplacement, après 28 jours. La distribution des pores dans la structure, le poids volumique et la durabilité de ces échantillons ont été étudié et comparé avec un mortier normal. Ces résultats montrent un grand intérêt pour la fabrication des pavés et des produits pour la zone piétonne.

**Mots-Clés:** Mortier, cendre volante papetière, laitier moulu, valorisation, recyclage de déchets

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: sahar.seifi@unicaen.fr

## Sediment Uses as Resources In Circular And Territorial EconomieS (SURICATES, Interreg-NWE project 2017-2021)

Eric Masson <sup>ψ1</sup>, S. Cabarry<sup>1</sup>, J. Harrington<sup>2</sup>, H. Groot<sup>3</sup>, B. Lemiere<sup>4</sup>, M. Wensveen<sup>5</sup>, A. Hamilton<sup>6</sup>,  
R. Lord<sup>7</sup>, T. Debuigne<sup>8</sup>, M. Benzerzour<sup>9</sup>, J. Murphy<sup>10</sup>, C. Traisnel<sup>11</sup>

<sup>1</sup> Université de Lille, Sciences et Technologies – France, <sup>2</sup> Cork Institute of Technologies – Ireland, <sup>3</sup> Deltares – The Netherlands, <sup>4</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières – France, <sup>5</sup> Port of Rotterdam – The Netherlands, <sup>6</sup> Scottish Canals/British Waterways – United Kingdom, <sup>7</sup> University of Strathclyde – United Kingdom, <sup>8</sup> Ixsane – France, <sup>9</sup> Armines/IMT Lille-Douai – France, <sup>10</sup> University College of Cork - Ireland <sup>11</sup> Team<sup>2</sup> - France.

This contribution will present the Suricates NWE Interreg project which aim is to increase sediment reuse for erosion and flood protection. As an applied research project, Suricates will provide authorities, port and waterway managers and erosion experts with new large scale solutions for sediment reuse in NWE ports, waterways and coastlines.

Climate change, erosion and flood risk increase require greater mitigation measures, consuming high volumes of natural resources. However, dredged sediments are a problem for EU ports/waterways providing navigation access with 200 millions m<sup>3</sup>/y (80 millions tons dry weight) generated. Increased social and environmental pressures show the critical need for new solutions to maintain and develop activity. Currently, more than 99% of EU marine sediment dredged is dumped at sea/managed as waste, with only 1% (800 000 t/year) reused. In SURICATES, 220 000t of sediment will be used in 4 new solutions as raw material to build resilient flood/erosion protection systems. Suricates project targets an increase in the number of sediment reuse projects in NWE to drive sediment reuse to 1.3 Mt/y after 5 years, and 2.3Mt/y after 10 years in the EU. From the former CEAMaS NWE Interreg project looking at potential interest in reuse strategies demonstration, Suricates will provide support for erosion/flood risk market development with local impact optimisation of sediment reuse. Ongoing research and applied activities will implement tools and methods for impact quantification at regional scale using social, economic, employment and environmental modeling and will test eco-innovative techniques in real-life conditions providing long term impact evaluation and guidelines for replication: riverbank strengthening, regeneration of harbour/river banks and beach nourishment.

Pilot implementation with long term impacts on territories is planned within the project for UK and NL. Dissemination and operational guidance will be developed and shared with local, national and EU authorities for implementation on project completion.

**Mots-Clés:** Sediment, Reuse, Material applications, Harbour, North Western Europe

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: eric.masson@univ-lille1.fr



## 14.2. Géothermie

## From the field observations to the seismic lines: focus on the understanding of the Permian – basement transition, a potential geothermal resource?

Coralie Aichholzer <sup>\*ψ1</sup>, Philippe Düringer <sup>2</sup>, Albert Genter <sup>3</sup>

<sup>1</sup> EOST-IPGS UMR7516 – Université de Strasbourg, CNRS : UMR7516 – France

<sup>2</sup> UMR 7516 Institut de physique du globe – université de Strasbourg – France

<sup>3</sup> ES-Géothermie – France

Since many years, the geothermal energy is taking place in the Upper Rhine Graben (URG) with many different geothermal power-plants. One of the last projects will be drilled soon at 3000m deep in the Strasbourg area (north east France). These new wells will cross the entire sedimentary cover, from the Quaternary sediments down to the Variscan granitic basement. It is this sedimentary cover – basement interface which is the geothermal exploration goal because it is known that the heat circulates through a vertical fracture network permitting hydrothermal convective cells (1 Pribnow and Schellschmidt, 2000). This cover is well constrained in the north Alsace (2 Aichholzer and al., 2016). Although most of the sedimentary cover (excluding faults) is relatively well known, there are still several unknowns for the Strasbourg area. And one of the main takes place in the Permian unit between the Paleozoic basement and the Buntsandstein sandstones (geothermal reservoir). Indeed, the transition remains poorly documented mainly because of the great diversity of facies, both for the basement (presence or not of a granitic basement, or metamorphic, whose nature will have a direct impact on the heat exploitation) and for the sedimentary cover (existence or absence of Permian series and nature of these pre-Triassic formations). The real thickness and nature of the Tertiary could be twice thicker and locally more detrital than on the wells in the northern part of the URG. Therefore many geological field campaigns were conducted in the Vosges region (France) and in the Black Forest (Germany) to try to characterize this transition in term of stratigraphic, sedimentary and structural modalities. Those results associated to recent 2D seismic lines acquired in the Strasbourg area are used to understand more precisely the sedimentary Permian units – crystalline basement interface, to know if it is also a potential geothermal resource like the Buntsandstein.

1 D. Pribnow and R. Schellschmidt. Thermal tracking of upper crustal fluid flow in the Rhine Graben. Geophys Res Lett. 2000;27(13):1957-60. 2 C. Aichholzer, P. Düringer, S. Orciani, A. Genter. New stratigraphic interpretation of the Soultz-sous-Forêts thirty-year-old geothermal wells calibrated on the recent one from Rittershoffen (URG, France). Geothermal Energy Journal 2016, 4:13.doi:10.1186/s40517-016-0055-7.

**Mots-Clés:** stratigraphy, sedimentology, geothermal energy

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: caichholzer@unistra.fr

## Caractérisation des propriétés réservoirs de roches volcaniques appliquée au projet de géothermie GEOTREF sur Basse - Terre de Guadeloupe

Yassine Azzimani \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géosciences et Environnement Cergy (GEC) – Université de Cergy Pontoise : EA4506 – France

Le projet GEOTREF a pour but l'évaluation de la ressource géothermique dans le secteur de Vieux - Habitants (Basse-Terre de Guadeloupe). Aucun forage n'étant encore disponible, il faut rechercher en surface des analogues des réservoirs profonds. C'est dans la zone septentrionale de Basse-Terre que se trouvent les andésites et coulées de débris les plus anciennes (près de 3 Ma). Compte tenu du taux d'érosion élevé (de l'ordre présumé de 0,5 à 1km / Ma), les roches affleurant à l'anse Tillet proviendraient d'une profondeur d'environ 1,5 à 3 km et seraient ainsi comparables au réservoir situé sous Vieux - Habitants. Dans un réservoir géothermique, les fluides circulent le long de discontinuités (fractures, limites de coulées de lave ou de débris, schistosité) en l'absence de porosité de matrice connectée. A l'anse Tillet, la caractérisation de ces discontinuités montre que i) les fractures ont majoritairement un pendage fort ( $> 60^\circ$ ) évoquant une origine extensive, ii) des directions de failles régionales sont exprimées, iii) les fractures ont une dimension fractale très constante ( $D=0,4$ ) indiquant des fractures plutôt groupées en amas, sauf dans les couloirs de fractures où la dimension fractale plus élevée ( $D=0,7$ ) montre un espacement plus régulier, iv) l'aire occupée par les discontinuités sur l'affleurement dépend de leur ouverture plus que de leur longueur, v) des dépôts d'argiles similaires, provenant de paléo-circulations de fluides, sont trouvés dans les fractures et dans la schistosité, indiquant leur connexion et donc des transferts latéraux de fluides. En effet, la circulation de fluides hydrothermaux engendre une altération de la roche et la cristallisation de minéraux néoformés dans les discontinuités et leur encaissant. A Tillet, les minéraux argileux issus de cette transformation sont comparables à ceux trouvés dans le champ géothermique de Bouillante (15 km au nord de Vieux - Habitants), exploité pour la production d'électricité. Les minéraux argileux trouvés dans les discontinuités sont majoritairement : i) de la smectite, présente à la fois dans les fractures et les plans de schistosité ii) de la kaolinite, présente dans les fractures iii) potentiellement de la chlorite ferrifère, observée dans une fracture verticale bréchifiée. L'association de ces minéraux indiquerait une température des paléo-fluides de l'ordre de 100 à 190°C, soulignant ainsi le caractère tardif de ces derniers.

**Mots-Clés:** géothermie, Guadeloupe, analyse fractale, fractures, altération hydrothermale

\*Intervenant

## Characterization of an exhumed high temperature paleo-geothermal reservoir by clay minerals and secondary phases identifications in Terre-de-Haut island (Les Saintes archipelago, Guadeloupe)

Gildas Beauchamps <sup>\*1</sup>, Béatrice Ledésert <sup>1</sup>, Ronan Hebert <sup>1</sup>, Franck Bourdelle <sup>2</sup>, Michel Dubois <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géosciences et Environnement Cergy (GEC) – Université de Cergy Pontoise, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Génie-Civil et géo-Environnement (LGCgE) – Université Lille, EA4515 – France

Due to its geodynamic location on the Lesser Antilles arc, Basse-Terre of Guadeloupe (Lesser Antilles, France) displays an active volcanism which is favorable for the development of geothermal energy associated to power generation. Thus, twenty years ago, the Bouillante geothermal field was brought into production and produces 15 MWe (Bouchot et al., 2010).

An exhumed analog of the Bouillante geothermal reservoir has been identified in Terre-de-Haut island (Les Saintes archipelago) (Verati et al., 2016), which represents a key area to study the paleo-hydrothermal alterations, and the interactions between the paleo-hydrothermal fluids and the surrounding rocks. The aim of this study is to characterize the mineralogical and petrographical features of the paleo-hydrothermal alterations through the study of newly formed minerals, specifically by carrying out clay minerals analyses, geothermometry on chlorite and fluid inclusions. The clay assemblages show a specific concentric distribution at the scale of the island, with chlorite crystallization in the core, smectite in the surroundings, and illite in an intermediate halo. Similarly, data obtained in boreholes of Bouillante show the apparition of illite and chlorite in deeper parts, associated with a temperature increase, with chlorite located in the heart of the geothermal reservoir (Bouchot et al., 2010). Hence, thanks to the exhumation, we are looking to an horizontal section through the paleo-system of Terre-de-Haut, where we observe a lateral temperature gradient resulting from the paleo-hydrothermal alteration. Geothermometry on chlorite based on geothermometer developed for low temperature chlorites ( $T < 350^{\circ}\text{C}$ ) and pressures below 4 kbar (Bourdelle et al., 2012), has been applied on chlorite from both Terre-de-Haut paleo-system and from the active geothermal system of Bouillante. The results show a great difference between calculated temperature of chlorite formation in Terre-de-Haut (around  $140^{\circ}\text{C}$ ) and around  $230^{\circ}\text{C}$  in Bouillante (in agreement with temperature measured in boreholes in Bouillante; Mas et al., 2006). Observations on newly formed euhedral quartz, sampled in a geode located in a fracture zone, reveal the presence of numerous primary fluid inclusions. Preliminary results indicate very low salinity (2% NaCl), and a temperature of around 150-200 C in inclusions located in the core of the crystals, decreasing to around 70 C or less on the outer growthzones. This evolution can be interpreted as a record of the fluid cooling during system evolution. This study shows that clay mineral identification and geothermometry on newly formed minerals are key steps to the understanding of the paleo-geothermal reservoir of Terre-de-Haut and its evolution.

**Mots-Clés:** Hydrothermal alteration, Clays, Geothermometry, Paleo, geothermal system, Guadeloupe, Fluid inclusions

## Thermal structure of the Paris Basin

Damien Bonte <sup>\*1</sup>, Laurent Guillou-Frottier <sup>2</sup>, Jan-Diederik Van Wees <sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Utrecht University, Utrecht, The Netherlands – Pays-Bas

<sup>2</sup> BRGM, Orléans, France – BRGM – France

<sup>3</sup> TNO, Utrecht, The Netherlands – Pays-Bas

Deep temperatures in basins is one of the key parameters in the exploration of geothermal energy. The temperature in the Paris Basin has been describe in the past using a wide range of modelling methods from interpretation of individual measurments (Gable, 1978) to full 3D statistical analysis (Bonté et al, 2010) and 3D model (Bonté et al., 2013). We present here a D model based on a proven methodology that has been successfully appiled in the Pannonian Basin (Békési et al, 2017) and in the Netherlands (Bonté et al., *in prep.*). The methodology, described in Limberger et al. (2018) first adopt an a-priori physics-based forward model that is then updated through a data assimilation method in order to provide a better fit between measured and predicted temperatures.

The temperature dataset required for the calibration is largely composed of BHT (some 2443 values). These BHT measurements required correction due to the thermal disturbance created during drilling. After correction, which was carried out using the Instantaneous Cylinder Source (ICS) method, 494 corrected BHT (BHTx) values were available for the modelling of the Paris Basin. In addition to these BHTx, some 15 DST measurements that are considered as close to the thermal equilibrium (i.e.,  $\pm 5^\circ\text{C}$ ) were added to the temperature calibration values. According to this dataset of BHTx and DST, the average gradient in the Paris Basin was calculated as  $34.9^\circ\text{C}/\text{km}$  when the surface temperature is fixed at  $10^\circ\text{C}$ . The model was computed at the lithospheric scale for thermal boundary purposes but focuses on the temperature field in the sedimentary basin fill. It takes into the geometry of the basin and sedimentary layers, as well as the heat production and thermal conductivity based on their specific lithological composition. The result is a 3D thermal block that is presented in the form of isodepth maps, and 1D thermal profile to characterise the differences between measured dat aand model.

The results are strongly influenced by thermal conductivity variations such as those due to differences in sediment composition, while faults create some more localised influences. Based on the recent work of Baptiste (2016), the influence of the pre-triassic basement is considered.

**Mots-Clés:** Temperature, Modelling, Paris Basin, geothermal energy

<sup>\*</sup>Intervenant

## Un modèle géologique 3D pour l'exploration géothermique de la plaine du Lamentin (Martinique) : impact de la structuration géologique profonde sur les circulations de fluides hydrothermaux

Séverine Carigt <sup>\*ψ1</sup>, Alain Gadalia <sup>1</sup>, Vincent Bouchot <sup>1</sup>, Philippe Calcagno <sup>1</sup>, Grabriel Courrioux <sup>1</sup>, Mathieu Darnet <sup>1</sup>, Mathieu Jacob <sup>1</sup>, Yannis Labeau <sup>2</sup>, Anne-Lise Tailame <sup>1</sup>, Monique Terrier <sup>1</sup>, Isabelle Thinon <sup>1</sup>, Benoit Vittecoq <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières – France

<sup>2</sup> Université des Antilles (Pôle Martinique) – Martinique

Dans un contexte de développement des énergies renouvelables parmi lesquelles la géothermie figure en bonne place en Martinique, l'exploration géothermique de la plaine du Lamentin, commencé il y a 50 ans a été relancée récemment. Cette zone présente en effet de nombreux indices hydrothermaux (sources chaudes, dépôts hydrothermaux, dégazages) rassemblés sur une zone d'activité en pleine expansion, aux portes de Fort-de-France.

L'exploration s'est cependant heurtée à la complexité géologique de la région (convergence de 5 ensembles volcaniques, 4 directions de failles ayant joué à différentes reprises) renforcée par le masquage de ces structures géologiques par les sédiments, la mangrove et la mer (Cohé du Lamentin et baie de Fort-de-France). Les campagnes d'exploration géothermique successives mais aussi d'autres travaux (approvisionnement en eau, ingénierie géologique) inhérents au développement péri-urbain de cette zone, ont cependant produit une grande quantité et diversité de données permettant d'étayer la connaissance géologique. Il importait donc de surmonter ces obstacles en rassemblant les connaissances acquises et en précisant certaines afin de passer au stade de faisabilité de l'exploitation géothermique (Gadalia *et al.*, 2017).

C'est dans ce cadre que le modèle géologique 3D (Geomodeller) de la région du Lamentin a été réalisé afin d'intégrer et mettre en cohérence les nombreuses données existantes, tant en surface qu'en profondeur (géologie, hydrogéologie, géophysique). La construction géométrique des formations et failles modélisées a nécessité de mener, en amont, une réflexion argumentée et harmonisée sur leurs interactions à partir des cartes, forages, mesures et observations de terrain pour aboutir à une interprétation collégiale de l'ensemble. Le modèle géologique 3D ainsi obtenu propose un scénario plausible (en l'état actuel de la connaissance) de l'empilement des dépôts volcaniques et sédimentaires de la région du Lamentin, mais aussi de leur extension et de leur épaisseur. De plus, il met en évidence l'impact de la fracturation associée aux différents évènements tectoniques subis par la région sur la géométrie actuelle de ces séries (décalages associés aux failles, approfondissement, variations d'épaisseurs, zone de dépôt ou de non dépôt...). La compréhension de cette structuration s'est avérée essentielle pour déterminer les circuits potentiels de circulation de fluides hydrothermaux à l'échelle régionale du Lamentin.

**Mots-Clés:** Géothermie, Exploration, Hydrothermalisme, Géologie, Tectonique, structurale, Mod- élisation 3D

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: s.carigt@brgm.fr

## Multiscale characterization of fracture systems: A case study of the Ardeche margin, France

Arezki Chabani <sup>\*1</sup>, Caroline Mehl <sup>1</sup>, Isabelle Cojan <sup>1</sup>, Dominique Bruel <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mines ParisTech - PSL research University – MINES ParisTech, PSL Research University – France

In order to assess the economic value of the geothermal field of the Valence basin (Geodenergie program, REFLET project), we explore, in this study, the spatial distribution of fracture systems at different scales. We characterize the orientations, length and spacing of fracture networks on DEM and geological maps for large scale and on field analogs for small scale.

In order to avoid subjectivity when identifying fracture sets from digitized maps, we adapt the method of Mixture of Von Mises distributions used for instance for wind direction analysis (Masseran et al., 2013). At large-scale, 2 sets of fractures, respectively striking N015°–N040° and N040° –N075° were identified between N000°E and N090°E. Between N090° and N180°E, 3 sets, orientated N075°–N120°, N120°–N160° and N160°–N015°, were identified but their orientations slightly vary according to the support (Geological or DEM map). At small scale, some differences are reported between the different outcrops of Triassic and Jurassic ages.

Sampling effects such as truncation and censoring at small and large scale induce degradation of the length and spacing distribution models. To correct these biases, we propose to generate two models (power law and exponential negative) and test their degree of correlation using F-statistic and R<sup>2</sup> parameters. After corrections, we fitted length and spacing distribution models following a power law with respectively an exponent  $a = -2$  and  $-2.18$ . However, a separation of the fracture systems by sets of orientation shows a variation of NE-SW faults explained by exponential negative model in contrary with the E-W and NW-SE explained by a power law model.

Masseran, N., Razali, A.M., Ibrahim, K., and Latif, M.T., 2013, Fitting a mixture of von Mises distributions in order to model data on wind direction in Peninsular Malaysia: Energy Conversion and Management, v. 72, p. 94-102.

**Mots-Clés:** Multiscale analysis, geothermal reservoirs, mixture Von Mises method, sampling effects.

<sup>\*</sup>Intervenant



## Efforts de développement de la géothermie à l'échelle des Hauts-de-France

Estelle Dourlat \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UniLaSalle – Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique– France

La géothermie n'est pas seulement destinée à alimenter des centrales électriques et des réseaux de chaleur urbains, elle peut également servir à la production de chaleur pour des projets de plus faible ampleur lorsqu'elle est assistée par pompe-à-chaleur. Cette géothermie, connue également comme Géothermie Très Basse Energie, exploite les températures stables du sous-sol à de faibles profondeurs (10 à 200 m de profondeur), grâce à des systèmes fermés (géothermie sur sondes verticales) ou ouverts (géothermie sur nappe).

Depuis la mise en place du cadre réglementaire de la Géothermie dite de Minime Importance (GMI) en 2015, certaines régions ont décidé d'encourager l'emploi des technologies associées. Les Hauts-de-France font partie de ces régions qui montrent l'exemple pour les efforts de développement de la géothermie en France. En effet, les exigences en 2012 du Schéma Régional Climat Air Energies Picardie (SRCAE) étaient de multiplier par 20 la production de chaleur par géothermie à l'horizon 2020. Si les chiffres à atteindre vont être modifiés suite à la création de la région des Hauts-de-France, la volonté de mettre l'accent sur cette énergie renouvelable restera bien présente. Corrélat à ces exigences, il apparaît que plus de 97% du territoire picard est favorable à l'exploitation de la Géothermie Très Basse Energie.

L'ADEME Hauts-de-France (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) et la Région Hauts-de-France ont déjà mené plusieurs actions pour encourager le développement de la géothermie dans cette région, avec notamment la mise en place d'une mission d'animation en géothermie, une formation dédiée aux architectes, le recensement des installations de géothermie existantes, l'audit d'installations et l'ouverture vers les projets de géothermie à plus grande échelle (réseaux de chaleur).

Un panorama de ces différentes actions sera présenté pour apporter un retour d'expérience à l'échelle de la région.

**Mots-Clés:** Géothermie Très Basse Energie, Hauts de France, animation régionale géothermie, potentiel de développement énergies renouvelables, transition énergétique

\*Intervenant

## L'étude de paléo-réservoirs exhumés dans les Petites Antilles : vers une meilleure compréhension des réservoirs géothermaux profonds en contexte d'arc volcanique

Alexiane Favier <sup>\*1,2</sup>, Chrystele Verati<sup>2</sup>, Michel Corsini<sup>2</sup>, Jean-Marc Lardeaux<sup>2,3</sup>, Philippe Munch<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Université des Antilles - Géosciences Montpellier (GM - UA) - Guadeloupe

<sup>2</sup> Géoazur (GEOAZUR) - Université Côte d'Azur, CNRS, IRD, Observatoire de la Côte d'Azur, UMR7329, Fr

<sup>3</sup> Czech Geological Survey, Center for Lithospheric Research - République tchèque

<sup>4</sup> Géosciences Montpellier (GM) - Université de Montpellier, CNRS, Géosciences Montpellier : UMR5243, France

L'étude des analogues fossiles exhumés est une pratique courante dans le secteur pétrolier pour appréhender l'architecture des réseaux de migration de fluides dans les réservoirs. Afin de poursuivre le développement de la géothermie de haute énergie dans les Petites Antilles nous proposons de caractériser les parties profondes d'un réservoir géothermal par l'étude d'un paléo-système exhumé dans l'archipel de Guadeloupe (Projet GEOTREF du Programme Investissements d'Avenir). Dans l'archipel de Guadeloupe, l'arc volcanique actif est localisé sur la Basse-Terre et les îles des Saintes. La seule centrale géothermique de l'arc, en cours d'exploitation pour la production d'électricité depuis 1980, se situe à Bouillante (Basse-Terre). Nous avons récemment identifié, sur l'île de Terre-de-Haut (Les Saintes), un paléo-système exhumé pouvant servir de référence pour étudier le réservoir géothermal actuel de la Basse-Terre (Verati et al., 2016). Nous avons mené des analyses géochimiques et pétrologiques détaillées (géochimie des laves calco-alcalines, analyses des paragenèses minéralogiques, modélisations thermodynamiques, ...) sur la zone la plus fortement hydrothermalisée de Terre-de-Haut. Nous identifions ainsi un assemblage minéralogique à l'état d'équilibre entre 0,25 - 1,5 kbar et 350 - 450°C, en conditions saturées en H<sub>2</sub>O. Ces conditions thermodynamiques correspondent à un gradient géothermique de l'ordre de 120 à 150°C/km. De telles valeurs sont supérieures à celles du gradient géothermique conductif mesuré en Guadeloupe (70-100°C/km), mais elles sont cohérentes avec les températures mesurées dans les puits de forages de Bouillante. Ces nouvelles données démontrent que la zone hydrothermale de Terre de Haut correspond bien à un paléo-réservoir géothermal. L'identification de muscovite néoformée a permis de dater ce paléo-réservoir par la méthode 40Ar/39Ar à 2,6 +/- 0,2 Ma, et de contraindre sa durée de fonctionnement à un maximum de 600 000 ans. Au sein de ce paléo-réservoir nous avons identifié l'existence de couloirs de schistosité, témoignant d'une déformation réalisée à la transition fragile/ductile et contrôlée par des mécanismes de dissolution-recristallisation. Les zones schisteuses sont organisées selon quatre directions principales (N170-N020, N040-N060, N080-N110 et N120-N150). Les directions principales de déformation ductiles sont compatibles avec les systèmes de failles actives connus à l'échelle régionale en Guadeloupe démontrant la pérennité du champ de déformation sur les 2 derniers millions d'années. L'analyse des relations cristallisations/déformations démontre que les zones schisteuses, dont les pendages varient entre 10 et 80 degrés, servent de drains pour les transferts des fluides hydrothermaux et contrôlent le système convectif à l'origine de la ressource géothermale.

**Mots-Clés:** géothermie, paléo, réservoir, déformation ductile, hydrothermalisme, pression, dissolution, schistosité, géochronologie

## Y a-t'il un lien entre la minéralogie, la pétrophysique et les comportements hydraulique et sismique du granite de Soultz-sous-Forêts durant les stimulations ?

Béatrice Ledésert <sup>\*ψ1</sup>, Carola Meller <sup>2</sup>, Ronan Hebert <sup>1</sup>, Daphné Moulin <sup>1</sup>, Myriam Benbihi <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Cergy Pontoise (UCP) – laboratoire GEC – France

<sup>2</sup> KIT Karlsruhe, Institute of Applied Geosciences, Geothermal Research – Allemagne

Dans le cadre du Système Géothermique Amélioré (ou Stimulé ; Enhanced Geothermal System, EGS) européen de Soultz sous Forêts (Alsace, France), 20 années de tests scientifiques et préindustriels ont dû être effectuées avant que le site commence la production d'électricité en 2008. En particulier, des stimulations ont été réalisées afin d'augmenter la perméabilité du réservoir développé en milieu granitique et situé entre 4000 et 5000m de profondeur. En effet, la plupart des très nombreuses fractures qui recoupent le socle au droit de Soultz sont colmatées par des minéraux secondaires qui ont précipité en réponse à la circulation de saumures chaudes dans le réseau de fractures.

Des stimulations hydrauliques, par injection d'eau sous pression, ont été effectuées dans les quatre forages profonds (GPK1, GPK2, GPK3, and GPK4) et ont induit de nombreux microséismes qui ne peuvent pas être expliqués seulement par les structures tectoniques. Nous proposons une revue des tests hydrauliques et leur réinterprétation à la lumière de données minéralogiques obtenues dans les forages.

Une relation étroite apparaît entre la minéralogie (principalement le contenu en argiles et calcite) et les propriétés pétrophysiques, mécaniques et hydrauliques du granite de Soultz sous Forêts. Le pourcentage de calcite dans le granite peut atteindre 13% dans les zones altérées du granite de Soultz, alors qu'il est au maximum de 1% dans un granite sain. Les concentrations élevées en calcite sont corrélées avec de fortes concentrations en minéraux argileux, un faible module d'Young, une faible susceptibilité magnétique et de fortes variations de gamma-ray spectral.

Les microséismes sont générés dans les zones de granite sain, tandis que les zones riches en calcite et minéraux argileux, liées à une forte altération hydrothermale en relation avec les circulations de fluides géothermaux dans les fractures, se conduisent de manière asismique durant les stimulations hydrauliques. Ces résultats montrent l'importance d'une connaissance approfondie de la pétrographie d'un réservoir géothermal pour conduire une stimulation efficace tout en gardant le risque sismique à un minimum.

**Mots-Clés:** Soultz sous Forêts, système géothermique amélioré, microséismicité, minéralogie, propriétés pétrophysiques, stimulations hydrauliques

Intervenant

<sup>\*</sup>Auteur correspondant: ledesert@u-cergy.fr

## Modélisation hydrothermale des systèmes géothermiques profonds avec le code ComPASS

Simon Lopez <sup>\*ψ1</sup>, Roland Masson <sup>2,3</sup>, Laurence Beaude <sup>4,5</sup>, Michel Kern <sup>6</sup>, Farid Smaï <sup>1</sup>,  
Jean-Pierre Vergnes, Konstantin Brenner <sup>2,3</sup>, Gabriel Courrioux <sup>1</sup>, Séverine Caritg <sup>1</sup>, Labeau Yannis

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières, BRGM – France

<sup>2</sup> Laboratoire de Mathématiques J.A. Dieudonné – Université de Nice Sophia-Antipolis – Parc Valrose, 06108 Nice Cedex 02, France

<sup>3</sup> Team Coffee – INRIA Sophia Antipolis Méditerranée – 2004 Route des Lucioles, 06902 Valbonne, France

<sup>4</sup> Equipe COFFEE – INRIA Sophia Antipolis Méditerranée – France

<sup>5</sup> Laboratoire de Mathématiques J.A. Dieudonné – Université Nice Sophia Antipolis (UNS) – France

<sup>6</sup> INRIA – INRIA – France

Afin de mieux caractériser les ressources géothermales profondes, à l'aide de modèles conceptuels quantitatifs, physiquement cohérents, l'intégration de différentes approches est nécessaire.

Ces systèmes, tout particulièrement ceux de haute énergie, se trouvent souvent dans des contextes géodynamiquement actifs avec une architecture géologique complexe et des structures multi-échelles. Les zones de failles et les fractures y exercent fréquemment un contrôle prédominant sur les transferts de masse et d'énergie. Les méthodes de modélisation géologique basées sur un formalisme implicite offrent un cadre efficace pour construire rapidement des modèles structuraux de ces systèmes, incluant des zones de discontinuités. La réalisation de simulations dynamiques passe ensuite par la tâche, non triviale, de construction d'un maillage volumique non structuré qui discrétise ces géométries. Au cours des dernières années, de nombreux progrès ont été accomplis pour la discrétisation des processus de diffusion dans les milieux poreux. Ces recherches ont abouti à plusieurs schémas numériques capables de traiter de manière efficace les hétérogénéités spatiales souterraines (variations de perméabilité, anisotropies ...) et valables sur des maillages polyédriques généraux.

A travers plusieurs exemples, nous présentons l'outil ComPASS, qui s'appuie sur ces développements récents (schéma volume fini *Vertex Approximate Gradient*) pour simuler les transferts hydrothermaux multi-phases et multi-composants. Les simulations peuvent être effectuées sur des maillages non structurés incluant des réseaux complexes de fractures (*Discrete Fracture Networks*), dans lesquels l'écoulement est bidimensionnel, couplé à l'écoulement tridimensionnel dans la matrice poreuse (modèle hybride). La description physique du système repose sur une formulation de type Coats. L'intégration temporelle est implicite en temps et le système non linéaire résultant est résolu en parallèle en utilisant la bibliothèque PETSc.

ComPASS est développé de manière collaborative et distribué sous licence libre GPL. Il utilise une interface de haut niveau en Python, alors que les routines de calcul principales sont écrites en langage compilé.

**Mots-Clés:** modélisation hydrothermale, géothermie, modélisation géologique

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: s.lopez@brgm.fr

## L'évaluation de la ressource géothermique du Trias sous la ville de Cergy-Pontoise : caractérisation des formations réservoir et construction d'un modèle structural du sous-sol de l'agglomération

Sarah Margueret <sup>\*1</sup>, Sylvie Bourquin <sup>2</sup>, Marta Gasparrini <sup>3</sup>, Béatrice Ledesert <sup>1</sup>, Philippe Robion <sup>1</sup>, Xavier Sengelen <sup>1</sup>, Eric Leoutre <sup>1</sup>, Virginie Picornell <sup>1</sup>, Christophe Barnes <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Géosciences et Environnement Cergy (GEC) – Université de Cergy Pontoise : EA4506 – France  
<sup>2</sup> Géosciences Rennes (GR) – Université de Rennes 1 – Bâtiment 15 - Université de Rennes 1 – Campus de Beaulieu - 263 Av du général Leclerc- CS 74205 - 35042 Rennes Cedex - France, France  
<sup>3</sup> Institut Français du Pétrole Energie Nouvelle – IFP Energies Nouvelles, IFP Energies Nouvelles – France

Dans le cadre de son Plan Climat, la Communauté d'Agglomération de Cergy-Pontoise (CACP) souhaite développer les énergies renouvelables sur son territoire. Ainsi elle s'est associée au laboratoire " Géoscience et Environnement Cergy " (GEC) afin d'évaluer le potentiel géothermique des couches profondes de la zone. Cette étude s'appuie sur les données de puits d'exploitation géothermique du Dogger à Cergy-Pontoise des années 1980 et les différentes connaissances du bassin de Paris déjà publiées. Elle utilise également les études de la ressource géothermique du Trias dans le bassin de Paris effectuées par le BRGM. Ainsi, l'objectif final de cette étude est de modéliser les structures tectoniques profondes grâce à l'étude de profils sismiques, et de caractériser les réservoirs du Trias de la région de Cergy en menant une étude stratigraphique, sédimentologique et pétrophysique des réservoirs à partir de données de forages, de carottes et de diagraphies.

Les questions scientifiques qui se posent sont :

- Comment les paléo-environnements de dépôt et le contexte structural impactent-ils la qualité et la continuité des réservoirs ?

- Ces résultats permettent-ils d'estimer le potentiel géothermique de Cergy-Pontoise ?

Au Trias supérieur, l'extrême ouest du bassin de Paris enregistre les derniers dépôts continentaux issus de l'érosion des massifs hercyniens, avant la phase transgressive du Lias. Ces dépôts triasiques se biseautent vers le NW du bassin, jusqu'en Normandie. Ainsi, la zone d'étude se situe au sein de ce biseau, dans le graben du Vexin, entre les failles du Bray et de la Seine. Elle contient 17 puits d'exploration pétrolière datant des années 1970-80, sur un rayon de 50km autour de Cergy-Pontoise. Ces puits ont fait l'objet de corrélations diagraphiques afin de préciser l'étendue des réservoirs et leur architecture en 3D. En parallèle, 47m de carottes en continu du Trias ont été étudiés. Une étude de détail des macrofaciès a permis de reconstituer différents environnements de dépôt ainsi que l'estimation de la porosité en 2D (point-counting) sur les 27 lames minces de cette même carotte. De plus, différentes cimentations de la matrice ont été identifiées. Les propriétés pétrophysiques de ces échantillons a été caractérisé par des essais de perméabilité et porosité à l'eau. Enfin, l'étude de lignes sismiques traitées au GEC a permis de préciser les failles qui affectent les réservoirs du Trias.

**Mots-Clés:** géothermie profonde, bassin parisien, trias, corrélations diagraphiques, sédimentologie, modèle structural 3d

## Caractérisation d'une anomalie thermique d'origine hydrothermale par la thermochronologie (U-Th)/He sur apatites : exemple du système actif de la faille de la Têt (Pyrénées Orientales)

Gaétan Milesi <sup>\*1</sup>, Roger Soliva <sup>1</sup>, Patrick Monié <sup>1</sup>, Philippe Munch <sup>1</sup>, Mathieu Bellanger <sup>2</sup>, Olivier Bruguier <sup>1</sup>, Audrey Taillefer <sup>1</sup>, Michael Bonno <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Montpellier – Université de Montpellier : UMR5243, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5243 – France

<sup>2</sup> TLS Geothermics – Aucune – France

Dans la partie Est des Pyrénées, la faille de la Têt localise 29 sources chaudes regroupées en 4 essaims distincts essentiellement situés dans l'endommagement du mur de la faille. Notre étude porte sur les sources de Thuès-entre-Valls qui atteignent des températures de 75OC. Les modèles numériques (Taillefer et al., 2017) suggèrent l'existence d'une perturbation thermique centrée sur la faille, s'étalant sur une distance de 1500 mètres au mur de la faille. Notre étude vise à étudier l'impact d'une anomalie thermique sur les âges (U-Th)/He sur apatites (AHe).

Les âges AHe des échantillons adjacents à la faille, situés dans la zone de circulation maximale des fluides, montrent un étalement important allant de 2,7 Ma à 36.6 Ma. A 225m de la faille, les âges sont groupés autour de  $3,7 \pm 1,3$  Ma. Entre 750m et 3700m de la faille, les échantillons prélevés à altitude croissante fournissent des valeurs de  $11,7 \pm 0,8$  Ma,  $13,4 \pm 0,8$  Ma,  $13,7 \pm 0,5$  Ma et  $19,9 \pm 1,7$  Ma.

Les âges obtenus hors de la zone de faille (11,7 à 19,9 Ma) suggèrent un taux moyen d'exhumation de 100m/Ma qui est compatible avec la phase d'activité majeure de la faille de la Têt et le taux déduit de données thermochronologiques (Maurel et al., 2008). En revanche, l'âge récent obtenu dans l'endommagement de la faille ( $3,7 \pm 1,3$  Ma) ne peut être expliqué par le contexte régional de dénudation et un refroidissement sous un gradient classique de 30°C/km. La présence d'une anomalie thermique est la seule façon d'expliquer cet âge jeune, soit par une anomalie datant de la création de la faille, soit par un reset plus récent. Les modèles de diffusion indiquent qu'il est nécessaire de maintenir une température de 90 à 120°C durant 0,1 Ma à 1 Ma pour évacuer 90% de l'hélium contenu dans une apatite. En considérant une température de fermeture de 45°C pour le système AHe (Ehlers et al., 2001) et l'érosion régionale, nos résultats suggèrent un gradient récent minimum de 90°C/km proche de la faille, cohérent avec celui issu des modèles numériques. Enfin, à proximité du cœur de faille, la dispersion extrême des âges est interprétée comme la conséquence d'un lessivage de l'uranium dans les apatites par les fluides hydrothermaux.

Ces résultats montrent qu'une zone d'endommagement et les circulations hydrothermales associées peuvent largement affecter les âges AHe. Cette approche ouvre aussi de nouvelles perspectives d'exploration pour la géothermie profonde en contexte cristallin.

**Mots-Clés:** géothermie, thermochronologie, anomalie thermique, système hydrothermal, Pyrénées

## Correlation between clay minerals and organic matter: potential source of information for paleo-geothermal evolution under low-grade metamorphic conditions

Sébastien Potel <sup>\*1</sup>, Tatiana Maison <sup>1</sup>, Pierre Malie <sup>1,2</sup>, Michael Patrick Doublier <sup>3</sup>,  
Rafael Ferreiro Mählmann <sup>4</sup>

<sup>1</sup> EA 7511 Basins-Reservoirs-Resources, UniLaSalle-UPJV, F-60026 Beauvais, France - Institut Polytechnique, Fr

<sup>2</sup> Laboratoire Géosciences Université de Montpellier CC.60 Place E.Bataillon. 34095 Montpellier Cedex 5 – Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique - France

<sup>3</sup> Resources Division | GEOSCIENCE AUSTRALIA - Cnr Jerrabomberra Avenue and Hindmarsh Drive Symonston ACT GPO Box 378 Canberra ACT 2601 Australia, Australie

<sup>4</sup> University of Darmstadt – Technische Universität Darmstadt, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Darmstadt, Germany, Allemagne

The evolution of clay minerals and organic matter are the most important source of information in order to decipher the thermal history of a sedimentary basin. The combination of these two methods (i.e., clay mineralogy and coal petrology) helps to gain insight into the tectonic evolution of low-grade metamorphic terranes. Studies in the last 50 years have tried to clarify the response of these two methods to pressure (P) and temperature (T) conditions. The literature leads to a comprehensive dataset between both methods and allows discrimination of many factors influencing both methods alongside to time, temperature and pressure. The purpose this contribution is to provide a review of several case studies from areas of different P/T conditions in the domain of low- and very low metamorphic grade.

In clay mineralogy, the most known method used for clay mineral studies is the Kübler Index (Kübler, 1964). This parameter is a diagnostic and sensitive parameter to determine the increase of the temperature from diagenesis to incipient metamorphism. In addition -and often applied complementary- K white mica b-cell dimension has been used to determine the nature of the pressure facies in the studied samples. This method is based on the fact that with increasing pressure, K-white mica shows an increasing celadonite content at constant temperature. In organic petrology, the method most commonly applied is based on the study of organic matter reflectance (vitrinite or bituminite). Maturation of organic matter is an irreversible process, very sensitive to temperature increase with a faster response as compared to clay minerals, which allows to constrain the maximum temperature reached in a basin.

The used of these methods in different areas (New Caledonia, Vosges, Montagne Noire, New Zealand) under different P-T conditions (HP to LP and LT to MT) have allowed to outline several pattern. For example, nappes with different tectono-thermal histories can be recognized by using both methods. Differences in K-white micas b-cell dimension in samples from different nappes with similar KI and reflectance values will indicate a different metamorphic history. It can help to distinguish between diagenesis pattern, inherited material, burial or contact metamorphism. Additional methods like fluid inclusions thermometry, dating and conodont alteration index for example help to better constrain these evolutions.

**Mots-Clés:** Low, grade metamorphism, Clay Minerals, Organic matter, Métamorphisme de basse température, argiles

## Les ressources géologiques hexagonales dans le cadre de la transition énergétique - la géothermie, le CCS et le stockage d'énergie

Christophe Rigollet \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> GEODENERGIES – BRGM – France

Dans le cadre de la transition énergétique, le sous-sol peut jouer un rôle majeur pour la décentralisation de la production d'énergie, la stabilisation du réseau électrique et la neutralité carbone de la production industrielle et ce par trois filières.

La première, la géothermie, consiste à exploiter l'eau chaude, en tant que telle pour alimenter des réseaux de chaleur, pour produire de l'électricité ou les deux en co-génération. Il existe en France de nombreuses exploitations de géothermie profonde comme en Guadeloupe, dans le Bassin de Paris ou dans le Fossé Rhénan. Plusieurs permis d'exploration sont également en cours en métropole et outre-mer. Cette filière, qui est relativement mature d'un point de vue technologique, est confrontée à des coûts d'exploration et production élevés. Un des enjeux majeurs est donc de développer des technologies alternatives qui permettraient de baisser les coûts de forage et d'exploitation.

La seconde filière, qui s'inscrit dans la perspective d'une société bas carbone, repose sur le stockage géologique du CO<sub>2</sub>. Il s'agit de capter le CO<sub>2</sub> au niveau des fumées industrielles au niveau des gros émetteurs, puis de l'injecter dans des aquifères profonds ou dans des anciens gisements d'hydrocarbures. Le Groupe d'Intérêt Scientifique Géodénergies et ses partenaires développent un nouveau concept de stockage géologique du CO<sub>2</sub> combiné à un doublet géothermique dans le cadre du projet CO<sub>2</sub>-Dissolved. Un des enjeux majeurs pour Géodénergies est de proposer des solutions décentralisées, à proximité des petits émetteurs, compatibles avec les contraintes locales du sous-sol.

La troisième découle du stockage géologique d'électricité sous la forme d'hydrogène ou d'air comprimé. Dès lors que l'éolien et le photovoltaïque dépendent du climat, la courbe de production d'électricité varie en fonction des variations climatiques indépendamment de l'évolution de la consommation. Il est donc nécessaire de stocker l'énergie les jours très ensoleillés ou ventés pour la restituer lorsque les conditions sont moins favorables. Le stockage géologique de l'énergie permettrait de stocker des quantités d'énergie plus importantes pour la restituer sur des périodes plus longues et contribuer ainsi à la décentralisation de la production d'électricité. La première solution envisagée serait d'hydrolyser de l'eau pour produire de l'hydrogène, le stocker dans le sous-sol, le récupérer et le turbiner pour reproduire de l'électricité quand cela est nécessaire. La seconde s'appuie sur le même principe qui consiste, avec l'électricité excédentaire, à comprimer de l'air, le stocker dans le sous-sol et le turbiner ensuite pour restituer de l'électricité. Une troisième solution consiste à stocker l'énergie sous la forme de chaleur ou de froid.

Cet exposé présentera à partir de cas concrets comment la ressource sous-sol en France peut répondre aux grands enjeux de la transition énergétique.

**Mots-Clés:** France, Transition énergétique, géothermie, stockage géologique du CO<sub>2</sub>, stockage d'énergie

## Which parameters control hot spring distribution and temperature of the Têt fault-related hydrothermal system ? An integrated multi-methods study

Audrey Taillefer <sup>\*1</sup>, Roger Soliva<sup>1</sup>, Laurent Guillou-Frottier<sup>2</sup>, Elisabeth Le Goff<sup>2</sup>, Grabriel Courrioux<sup>2</sup>,  
 Bernard Ladouce<sup>2</sup>, Simon Lopez<sup>2</sup>, Fabien Magri<sup>3</sup>, Martin Guillaume<sup>1</sup>, Gaétan Milesi<sup>1</sup>,  
 Romain Millot<sup>2</sup>, Jean-François Ritz<sup>1</sup>, Michel Séranne<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Montpellier (GM) - Université Montpellier II - MONTPELLIER CEDEX 5, France

<sup>2</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) (BRGM) - BRGM - France

<sup>3</sup> Department of Hydrogeology [UFZ Leipzig] - Allemagne

Non-magmatic hydrothermal systems in mountain ranges are poorly studied compared to extensive ones. They likely involve similar processes than those highlighted for other hydrogeothermal continental systems, however questions remain about : 1) the water origin and the structures responsible for efficient infiltrations, 2) the type of pathways from depth to the hot springs, and the conservation of the draining capacity, 3) the geometry and amplitude of the thermal anomalies and subsequent fluid-rock interactions in the deep transfer zone.

In Eastern Pyrénées (France), the alignment of 29 hot springs (29-73 °C) along the brittle Têt fault and its related high topography allows studying these processes. The integrative analysis of remote sensing, multi-scale geological field observations and hydrothermal fluid geochemistry, provides strong constraints to establish a realistic 3D numerical model coupling heat transfers with fluid flows. From the infiltration areas to the springs at the surface, we show that :

1. The hydrothermal fluids have a meteoric origin and infiltrate at high altitude (> 2200 m). Three intersecting fracture sets, resulting from three consecutive tectonic stages, pervasively distribute on the infiltration areas. They probably are efficient structures to transfer fluids through the crust to the hot springs.
2. Hot springs are mostly located close to the Têt fault, in its footwall, at the base of the most elevated topography. They always localize in crystalline rocks, at the interface with metasediments, related to unfaulted or faulted contacts by brittle or old ductile faults. Hot spring locations also match with intersections of brittle-fault damage zones.
3. Geochemistry of hydrothermal fluids indicates similar rock-water interactions for all the springs, suggesting a transfer zone of similar lithology. There is no mixing with superficial water, suggesting that differences of temperatures between hot springs are related to multiple pathways deriving from a thermal anomaly. In numerical models, flows mainly come from high reliefs in the fault footwall, or circulate along the fault plane. Hot spring temperatures depend on the temperature reached at depth, which depends on the flow depth. Flow distribution in the crust depends on the topography, both of the fault scarp and along the fault. The tops of the topography are infiltration areas, while low elevations are resurgence areas.

The understanding of fault and topography-related hydrothermal systems has strong implications for thermalism and for geothermal exploration.

**Mots-Clés:** hot spring, hydrothermal, Pyrénées, numerical modeling, orogenic



## 14.3. Température et flux de chaleur

## The effects of extreme sedimentation on the thermal structure of the Indian Plate in the Ganges-Meghna-Brahmaputra delta and tectonic implications

Celine Grall <sup>\*ψ1</sup>, Michael Steckler <sup>1</sup>, Roger Buck <sup>1</sup>, Bar Oryan <sup>1</sup>, Syed Humayun Akhter <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) - États-Unis

<sup>2</sup> Dhaka University - Bangladesh

On the eastern flank of the India-Eurasia collision, the Indian plate is obliquely subducting beneath southeast Asia. While more typical oceanic subduction occurs beneath the Sumatra-Andaman subduction zone, the northward continuation of this plate boundary encounters the thick sediments of the Ganges-Brahmaputra-Meghna Delta (GBMD). Here, the IndoBurma fold-belt is attempting to absorb the up to 19-km thick sediments deposited by the delta. This extreme sediment input should alter the thermal structure of the incoming plate, and influence the dynamics and seismogenesis of subduction. In order to estimate the effect of this sediment input on the thermal structure of the Indian Plate at the GBMD, we have modeled the depositional history of the Bengal Basin and the GBMD since the Cretaceous. The Bengal Basin was created by the early Cretaceous rifting of Antarctica. In response to the India-Asia collision, an immense influx of Himalayan sediment has been provided to the Bengal Basin. The shelf edge of the passive margin has prograded 300-400 km from the Hinge Zone in the Eocene to its current position forming the GBMD. This has prograded the shelf edge by 3-400 km since the Eocene. The current basin is the result of the superposition of this heavily-sedimented passive margin of India being overthrust both by the IndoBurma foldbelt from the east and the Shillong Plateau from the north. The history of sedimentation in the Bengal Basin has been reconstructed using published seismic and borehole data from the Surma Basin, a proven Miocene gas province, in northeastern Bangladesh. A set of 2D finite element thermal models have been undertaken. The downward thermal advection associated with rapid sedimentation and the blanketing effect of low thermal conductivity sediments, as well as the fluid generation and upward migration, and the development of overpressure are considered in these models. We have explored different initial crustal models and sediment properties. In all the models tested, the thermal gradient at the surface does not reach value higher than 15°C/km and significant overpressure is developed in the buried marine units below 10-12 km depth, as well as in the Miocene sandy reservoir units. Furthermore, the pressure and temperature at the sediment-crust interface meet the conditions of low grade metamorphism. We discuss the effect of these extreme thermo-mechanical conditions in the incoming plate on the dynamics and seismogenesis at this densely populated plate boundary.

**Mots-Clés:** Thermal structure, sediment thermal blanketing, Indian Plate, IndoBurma foldbelt

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: cgrall@ldeo.columbia.edu

## Thermal effects of subduction in the source rock maturity of Tumbes and Talara forearc basins

Adriana Lemgruber Traby <sup>\*ψ1</sup>, Nicolas Espurt <sup>2</sup>, Christine Souque <sup>1</sup>, Ysabel Calderon <sup>3</sup>

<sup>1</sup> IFP Energies nouvelles (IFPEN) – IFP Energies Nouvelles, IFP Energies Nouvelles – France

<sup>2</sup> Centre européen de recherche et d'enseignement de géosciences de l'environnement (CEREGE) – Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7330 – France

<sup>3</sup> Perupetro (Perupetro) – Pérou

Forearc systems are complex zones belonging on subduction zones. Forearc regions have been generally discarded by petroleum industry mostly because of their high structural and stratigraphic complexities, polyphase tectonic histories, active tectonics and their inferred low petroleum potential. The Talara basin of the North Peruvian forearc system is one of the striking exceptions to this generally held idea. This basin is considered as a giant oil province that is explored since 1869 and produced more than 1.7Bbbl of oil. However, the petroleum system remains poorly understood and the outer offshore part of Talara basin and the adjacent Tumbes basin are relatively unexplored and is now the subject of a new exploration campaign. This frontier zone represents a challenge for future georessource explorations and strategies in forearc areas. One important issue to evaluate the hydrocarbon potential of this area concerns the source-rock kitchens. Are they the same as those responsible for the known fields? Is the thermal maturity of the Talara and Tumbes depocenters sufficient to generate hydrocarbons from the potentially organic rich intervals?

We present a basement and sedimentary basin modeling calibrated in temperature along two NW-trending sequentially restored balanced cross sections. The cooling engendered by the subduction of the oceanic crust is considered in a basin and petroleum system model. The thermal history was calculated from the base of the thermal lithosphere to the sea/ground floor all along the basin evolution using heat advection and conduction, as well as radiogenic production in the continental crust.

This modeling shows the prime control of the cold nose engendered by the oceanic subduction and its impact on the thermal maturity of the Tumbes and Talara potential source rocks. As expected, the thermal cooling is more important close to the trench, whereas the more proximal areas are isolated by the down-lying continental crust. The present day basal heat flow varies from 30 mW/m<sup>2</sup> near the trench to 65 mW/m<sup>2</sup> onshore. At the onshore Lancones basin, the Cretaceous source rocks are completely overmature since the Eocene, when its burial reached 5 km-thick (before the Oligocene and Miocene erosion events). However, in the distal part of the Tumbes depocenter, the potential Tertiary source rocks (Heath Formation) reach the oil generation window only locally and very recently with at least 7 km-thick of burial.

**Mots-Clés:** forearc, thermal maturity, subduction, basin modeling

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: adriana.traby@ifpen.fr



## **14.4. Géomatique appliquée à l'exploration // Acceptabilité sociale de l'usage du sous-sol // Mines et après-mines : de la découverte d'un gisement à la gestion post-exploitation**

## Evolution naturelle des sites et impacts anthropiques sur la stabilité géo-mécanique des terrils

Arnaud Gauthier <sup>\*1</sup>, Laurent Lancelot <sup>1</sup>, Frédéric Kowalski <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) - EA 4515 (LGCgE) – Université de Lille – France

<sup>2</sup> Chaîne des Terrils - Base 11/19 - 62750 Loos-en-Gohelle - CPIE - France

Depuis plus de deux siècles, l'exploitation du charbon dans les Hauts de France a profondément marqué ce territoire. Un des témoins de cette activité industrielle consiste en l'établissement de Terrils, dépôts stériles de roches, 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. Des ravines plus ou moins profondes et importantes peuvent apparaître, de même que des phénomènes de décollement ou de glissement. Une partie de cette étude a ainsi porté sur la compréhension des mécanismes intervenant dans cette stabilité, notamment par rapport à un piétinement répété 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.

**Mots-Clés:** Terril, milieu granulaire, comportement mécanique, stabilité

\*Intervenant

## L'acceptabilité de l'activité minière en France

Jean-Pierre Kucheida \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Association des Communes Minières de France - France

Les ressources de notre sous-sol présentent un intérêt majeur pour notre pays. Leur exploitation représente une opportunité au regard du déficit commercial de la France et notamment de sa facture énergétique.

L'exploitation des ressources du sous-sol (et notamment des ressources énergétiques fossiles) fait l'objet d'un débat presque permanent depuis maintenant plusieurs années et est rejetée par les populations locales en raison des risques. Cependant, les risques sont inhérents à toute activité. Il faut être rationnel et permettre l'utilisation de nos ressources fossiles et des minerais rares.

Aujourd'hui, les projets d'exploitation des ressources du sous-sol se heurtent à la contestation des populations. C'est pourquoi la question de l'acceptabilité sociale des usages du sous-sol, et notamment des projets miniers, se pose. L'acceptabilité sociale des projets miniers ne peut être obtenue que si le public est impliqué dans le processus de décision mais surtout que si toutes les mesures sont prises pour compenser les conséquences de l'activité minière.

Un projet minier ne peut être accepté socialement que si les attentes des parties prenantes sont entendues. L'insuffisance d'information mais aussi de concertation du public nourri l'inquiétude des populations. Les projets miniers ne peuvent être acceptés que si un processus démocratique est mis en place permettant de prendre en compte les intérêts de toutes les parties prenantes (riverains, associations, collectivités, etc.).

Les projets miniers ne seront acceptés que si le dispositif après-mine est performant, permettant de remédier aux impacts de l'activité minière. Or le dispositif actuel nécessite d'être amélioré sur de nombreux points. L'activité minière a des impacts importants sur les territoires. Elle peut bouleverser les paysages et l'environnement, c'est pourquoi il est indispensable de remédier aux désordres. Bien que le code minier actuel prévoie des dispositions en matière d'après-mine, les bassins miniers rencontrent de nombreuses problématiques qui mettent ces territoires en grandes difficultés. Ce code nécessite une refonte totale. Il est particulièrement nécessaire de créer un volet spécifique après-mine qui permette notamment d'améliorer l'indemnisation de tous les dommages miniers et la gestion des risques miniers.

**Mots-Clés:** sous, sol, mine, après, mine, minier, énergie, ressources, acceptabilité, territoire

\*Intervenant

## Mine de sel d'Urcuit (France) : une approche globale de la procédure d'arrêt définitif des travaux miniers

Amélie Lecomte <sup>\*1</sup>, Arnaud Charmoille <sup>1</sup>, Xavier Daupley <sup>1</sup>, Farid Laouafa <sup>1</sup>, Thomas Richard <sup>1</sup>

<sup>1</sup> INERIS – Ministère de la Transition écologique et solidaire – France

La mine de sel d'Urcuit est située au sud-ouest de la France, près de Bayonne, entre la plaine piémontaise des Pyrénées et la vallée de l'Adour. L'exploitation minière, qui a duré plus d'un siècle, a consisté en l'exploitation, par dissolution, de plus de 5 millions de tonnes de sel du Trias présent localement entre 20 et plus de 200 m de profondeur. Plusieurs techniques de dissolution ont été mises en œuvre, créant plus de 80 cavités isolées ou connectées, dont un grand nombre sont encore présentes dans le sous-sol. Par le passé, des affaissements de terrain ou des effondrements en surface ont été localement observés et associés à des configurations géologiques, hydrogéologiques et minières particulières.

En application des dispositions du Code Minier, l'exploitant a engagé une procédure d'arrêt des travaux miniers et a confié à l'Ineris, en 2013, la réalisation de l'ensemble des pièces techniques et administratives du dossier de Déclaration d'Arrêt Définitif de Travaux miniers (DADT).

Grâce à deux années d'investigations sur le terrain, l'Ineris a pu appréhender précisément les contextes géologiques, géotechniques et hydrogéologiques du site afin d'évaluer, sur le long terme, la stabilité des cavités connues. Les investigations menées sur les eaux de surface et souterraines montrent que les processus de dissolution sont toujours actifs sur le site d'Urcuit mais leur extension et leur intensité sont fortement réduites du fait de l'arrêt de l'exploitation et des aménagements réalisés.

L'analyse en retour d'expérience des mesures des mouvements de terrain et la connaissance de l'état actuel des cavités (volume, forme, profondeur) ont été utilisées pour évaluer les potentialités de mouvements de terrain résiduels. L'étude géomécanique de la stabilité des cavités par modélisation numérique, prenant en compte la spécificité rhéologique du sel, a également complété cette évaluation. Afin de limiter l'impact des anciennes exploitations et de s'assurer de la stabilité des cavités et de l'absence de rejets trop importants de saumure dans l'environnement, des mesures compensatoires, adaptées aux enjeux, ont été proposées. Après le premier donné acte de l'Administration à la mi-2017, les travaux de fermeture et de surveillance de la mine ont commencé et certains dureront plusieurs années.

**Mots-Clés:** Mine, Après, mine, gestion post, exploitation, gisement de sel, dissolution, mouvements de terrain, mise en sécurité

<sup>\*</sup>Intervenant

## L'après-mine en France : un dispositif d'accompagnement technique vers la résilience des écosystèmes

Sandrine Lemal <sup>\*1</sup>, Georges Vigneron <sup>1</sup>, Rafik Hadadou <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières – Ministère de la Transition écologique et solidaire – France

<sup>2</sup> GEODERIS – Ministère de la Transition écologique et solidaire – France

La France, dont le sous-sol est riche de matières premières diverses, a vu se développer au XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècle une activité minière florissante. La fin de celle-ci à la fin du XX<sup>e</sup> siècle, du fait de l'accès facilité à des ressources moins onéreuses, a laissé derrière elle des bassins miniers meurtris par l'abandon d'une mono-industrie. C'est donc à la fin des années 90, après une série de mouvements de terrains inattendus qui ont détruit plusieurs dizaines d'habitations et traumatisés le sud du bassin ferrifère de la Lorraine (en France), qu'il a été pris conscience de la nécessité de gérer durablement, parfois pour des durées de plusieurs siècles, les conséquences techniques et environnementales de l'activité minière. Auparavant, si les conséquences économiques et sociales de la fermeture des mines pouvaient mobiliser lourdement tout l'appareil d'Etat, on considérait en revanche, mais à tort, qu'il n'y avait pas matière à une gestion des risques miniers au-delà des procédures d'arrêt des travaux par les anciens exploitants telles que prévues par le Code minier. Cette prise de conscience brutale a conduit l'Etat à mettre en place rapidement tout un ensemble d'outils pour assurer cette gestion des risques de l'après-mine : des outils juridiques d'abord, avec notamment l'organisation du transfert de la responsabilité de la gestion des risques mais aussi de la réparation des dommages vers l'Etat à la fin des concessions ou la disparition des anciens exploitants. Des outils opérationnels ensuite, avec d'une part le développement d'une capacité d'expertise au sein de GEODERIS regroupant des compétences de l'INERIS et du BRGM, et d'autre part la constitution, avec l'aide du transfert des compétences et des hommes de Charbonnages de France, d'une compétence opérationnelle de gestion de l'après-mine au sein du Département Prévention et Sécurité Minière (DPSM) du BRGM. Ce dispositif alliant expertise et gestion opérationnelle s'appuie sur des organismes de recherche comme le MINES ParisTech, chargés de développer les connaissances scientifiques afin de mieux comprendre, analyser et modéliser les différents phénomènes et mécanismes en jeu. Le rôle de l'Etat, usant de ces différents outils, se traduit au travers de trois objectifs : anticiper le risque, le prévenir sur le long terme et enfin réparer les dommages résultant de l'exploitation minière.

**Mots-Clés:** BRGM, DPSM, GEODERIS, APRES MINE, GESTION, ETAT

\*Intervenant

## L'après mine en région Hauts de France, quand la mission opérationnelle rejoint la science

Sandrine Lemal <sup>\*1</sup>, Valerie Wypych <sup>\*φ1</sup>

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières – Ministère de la Transition écologique et solidaire – France

En 2006, le dernier exploitant minier a organisé sa liquidation et les transferts de droits et obligations à l'Etat en organisant des travaux importants de démantèlement, en recensant à la fois tous les anciens objets miniers mais aussi en identifiant tous les processus naturels perturbés en cours de rééquilibrage qui nécessiteraient une surveillance. Aujourd'hui le DPSM Nord a donc en gestion pour le compte de l'Etat, plus de 700 anciens objets en surveillance et doit accompagner une nouvelle phénoménologie induite par l'exploitation minière à la fois en surface mais aussi en profondeur. En surface, la première réponse du milieu naturel à l'extraction souterraine est une variation topographique abaissant les niveaux naturels et causant des perturbations définitives dans les systèmes naturels de surface comme l'hydrologie ou artificiels comme les déviations dans les réseaux urbains. Ceci a pour conséquence la création de zones inondables "urbanisées", qu'il faut protéger. Ne pouvant être remédiée, cette conséquence a dû être compensée par l'installation de station de relèvement des eaux ayant pour mission de compenser le milieu naturel, là où il a été modifié. Ces installations, en gestion par le DPSM Nord, s'inscrivent dans une gestion à très long terme pour lutter contre le risque inondation et nécessite de poursuivre un suivi des variations topographiques. D'autres équipements font également l'objet d'une gestion à très long terme, notamment les équipements permettant de maîtriser la migration du gaz de mine induit par le destressement de terrain houiller au moment de l'exploitation. La production de gaz de mine dans le champ minier reste problématique en région Hauts de France puisque même après la fin de l'exploitation minière la production de gaz reste effective par différentiel de pression. Pour éviter, la migration du gaz de mine au travers des terrains ou des vestiges d'installations de surface, des dispositifs, appelés sondage de décompression ont été installés avec deux objectifs, éviter la mise en pression du gaz dans un milieu confiné et éviter la migration du gaz de manière non maîtriser. Ces équipements permettent donc de surveiller la mise en pression du réservoir et la qualité du mélange gazeux qui s'y forme. Ils sont complétés par la surveillance de la remontée de nappe du houiller qui sera susceptible d'accélérer la mise en pression du gaz à terme. L'exploitation minière avait également développé des process industriels permettant de valoriser le charbon. Toutes ces installations de transformation, bien que démantelées au-jourd'hui ont impacté la qualité des eaux de la nappe. De nombreux ouvrages permettent de surveiller cette qualité et de donner à l'Etat une vision claire pour mettre en place des outils de précaution. Tous ces dispositifs stratégiques pour le développement urbain doivent être intégrés aux politiques locales et doit faire l'objet d'un suivi attentif de la part de l'Etat pour garantir la sécurité des biens et des personnes.

**Mots-Clés:** DPSM, APRES MINE, BRGM, SECURITE MINIERE

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: v.wypych@brgm.fr

## In situ oxidation of sulfur rich outcropped lignite bed: formation of secondary hydrated Fe-Al sulfate efflorescences: copiapite, halotrichite, and gypsum at the post mining sector Saint Maime "Volx", Haut Alps-Provence Coal Basin, France

Naze Nancy Masalehdani \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Earth Sciences and Laboratoire de Génie Civil et Géo- Environnement, University of Lille 1, Villeneuve D'Ascq F-59655, Cedex, France – France

Lignite bed of about 3m thick outcrops at the bottom of overlying coal measures of Oligocene age at the post mining sector of Saint Mime Volx "Puits Neuf", Haut Alps-Provence Coal Basin. Coal measures are carbonate rich limestone, marl, bituminous shale and sandstone. At the study site the supergene secondary sulfate efflorescences occur on lignite substrate, they were identified using XRD, SEM-EDS and Raman as hydrated sulfates: copiapite  $\text{Fe}_2\text{+Fe}_3\text{+4}(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 20(\text{H}_2\text{O})$ ; halotrichite  $(\text{FeAl}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O})$  and gypsum  $(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ . Lignite is enriched in sulfur, it is exposed to the atmospheric air, giving favorable condition for the oxidation/ weathering of pyrite at  $\leq 25^\circ\text{C}$ . Oxidation of pyrite within the lignite itself undoubtedly has produced the formation of those secondary minerals, which precipitate upon evaporation of the acid-sulfate solution, similar to those formed around acid mine drainage (AMD) environment in the pH range 1.5-3.

**Mots-Clés:** Saint Mime, Haut Alps, Provence Coal Basin, lignite weathering, sulfate efflorescences, copiapite, halotrichite, gypsum

\*Intervenant

## La présence d'antimoine ( $> 10$ ppm) dans le quartz signe la minéralisation en Sb : Compilation de 5 districts minéralisés (Bournac, La Lucette, Le Semnon, Nades, Pouzol-Servant)

Loïs Monnier <sup>\*1</sup>, Anthony Pochon <sup>2</sup>, Stefano Salvi <sup>1</sup>, Melletton Jérémie <sup>2</sup>, Laurent Bailly <sup>2</sup>,  
Philippe Lach <sup>2</sup>, Didier Beziat <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) - Observatoire Midi-Pyrénées, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UMR239, Université Paul Sabatier [UPS] - Toulouse III, CNRS : UMR5563, Toulouse, France

<sup>2</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

L'antimoine peut atteindre des teneurs de l'ordre de 100 ppm dans le quartz de certains gisements épithermaux (Rusk et al 2011, Rusk 2012), alors qu'il est souvent sous la limite de détection (0,1 à 0,01 ppm en fonction des études) pour les quartz provenant de systèmes non minéralisés en Sb. Dans cette étude, nous avons analysé des quartz provenant de plusieurs districts antimonifères français dont la minéralisation en Sb est principalement constituée de stibine. Les cinq gisements étudiés présentent des teneurs relativement importantes en Sb dans le quartz ( $> 10$  ppm), et possèdent également une signature spécifique en divers éléments traces. L'antimoine ne montre aucune corrélation avec un autre élément chimique au sein du quartz, ce qui pourrait signifier que son incorporation est indépendante de celle des éléments classiquement présents dans le quartz (Al, Li, Ge...). Des valeurs intermédiaires (de l'ordre de 1 ppm) en Sb ont été mesurées dans les quartz du greisen et des veines minéralisées en Sn, W, et Nb-Ta du complexe granitique de Colettes/Beauvoir. Ceci pourrait indiquer une pré-concentration de l'antimoine dans des fluides orthomagmatiques. Bien que géographiquement très proches, les veines de Pouzol-Servant et de Nades ne seraient pas reliées à un même événement minéralisateur (textures et signatures chimiques des quartz différentes). Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives quant à la compréhension de la métallogénie de l'antimoine. Contrairement à de nombreux éléments rares (e.g. W, Sn, Ta, Nb, Ba, Cs, Rb), l'antimoine serait plus fortement concentré dans le quartz que dans les micas associés. Cela peut ainsi grandement guider les techniques de prospections chimiques concernant cet élément.

**Mots-Clés:** prospection chimique, antimoine, éléments traces dans le quartz

\*Intervenant

## La Rodde an old mine of Antimony (French Central Massif): between re-evaluation of the mining potential and environmental footprints

Mohamed Nasraoui <sup>\*1</sup>, Pierre Lavina , Michel Dubois <sup>ψ</sup>, Pascale Lutz

<sup>1</sup> Institut UniLaSalle – Ministère de l’Enseignement Supérieur et de la Recherche – France

The Sb-ore deposit of the old mine La Rodde, is a hydrothermal vein deposit belonging to the mining district of Brioude-Massiac (French Central Massif).

The multiphased mineralization carried firstly by sulphides of stibine-type, galena and arsenopyrite in a quartz gangue within veins mainly oriented NS becomes hosted by both sulphides and Sulphosalts (Semseyite, Boulangerite, Boumonite, Berthierite) in barite gangue within veins oriented NS to EW.

A brownfield exploration, including mapping, stream-sediment sampling and geophysical investigation (electrical panels), coupled with laboratory characterizations (optical/electronic microscopy and XRD) allowed a better understanding of the spatial distribution of the mineralization and bring also some additional precisions in terms of minerals paragenesis to the few available bibliography.

The antimony-bearing minerals being sulphides and sulphosalts have a high supergene alterability allowing a large mobilization halo of Sb and its accompanying elements (Pb, As, Cu ..) both in a proximal scale in the metamorphic host rocks and associated soils and also in a distal scale in stream-sediments, water streams and vegetation. This strong liberation of Sb and associated elements under surface/near surface alteration is useful for mining exploration, but generates a strong environmental impact.

The present study aims to provide a double view with a contribution to the re-evaluation of the mining potential of the area and some necessary data for a curative and preventive approach to geochemical elements release revealed in an around this site.

**Mots-Clés:** Antimony, Old Mine, brownfield exploration, elements release, environmental impact

\*Auteur correspondant: nasmofr@yahoo.fr

<sup>ψ</sup>Intervenant

## Analyse pétrographique et minéralogique déterminant les caractéristiques du gisement de manganèse de la mine de Biniomi

Marion Pierre <sup>\*1</sup>, Romain Guesdon <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> Institut Polytechnique LaSalle Beauvais – France

Le gisement de manganèse de Biniomi, situé au Gabon dans le bassin de Franceville, est exploité par la société nouvelle Gabon Mining.

Une étude pétrographique et minéralogique de ce gisement a été mise en place en partenariat avec la société Arethuse Géologie réalisant des expertises pour Nouvelle Gabon Mining. Cette étude menée sur différents échantillons permettra d'approfondir les connaissances sur ce gisement.

L'analyse pétrographique des échantillons reliée à l'histoire du gisement de Biniomi, déjà connue, permet de replacer chronologiquement les formations et les éléments géologiques les uns par rapport aux autres et de cibler les formations manganésifères.

Une visualisation au microscope à lumière réfléchie de lames minces permet de caractériser et décrire les différents minéraux manganésifères présents, ainsi que leurs organisations.

Enfin, une analyse au microscope électronique à balayage permet d'obtenir des renseignements supplémentaires sur la composition chimique des minéraux cibles.

**Mots-Clés:** ressources minières, gisement, manganèse, Gabon, Biniomi, microscope à lumière réfléchie, minéraux manganésifères, lumière polarisée non, analysée, lumière polarisée analysée, micro-scope électronique à balayage, composition chimique.

<sup>\*</sup>Intervenant

## Chemical and mineralogical traceability of gold, new improvements for responsible and sustainable mining

Anthony Pochon <sup>\*1</sup>, Laurent Bailly <sup>1</sup>, Anne-Marie Desaulty <sup>1</sup>, Isabelle Duhamel-Achin <sup>1</sup>, Philippe Lach <sup>1</sup>, Jérémie Melletton <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières – France

The use of toxic processes in gold mining (e.g. Hg) is a global problem conduced to the degradation of ecosystems and indirect health effects on local population. In France, the use of Hg for gold amalgamation has been prohibited in 2006 but artisanal and small-scale illegal mining still use it in French Guiana. After promising results on the feasibility study of gold traceability conducted in partnership with WWF (TAO project 2015), a new impulse has been given to the investigations of gold fingerprinting with the financial support of BRGM Carnot Institute. In order to display a better transparency of the gold industry and to limit illegal processes and risks, the aim of this project is to determine a signature of the origin of gold ores (primary, eluvial or alluvial grains) as well as "doré" (refined product of semi-pure gold) which is distinct from illegal sources and processing. Gold generally occurs in its native form, often alloyed with a narrow range of minor elements (e.g. Ag and Cu) in addition to a wide range of trace elements and mineral micro-inclusions. The approach of this study consists of (i) characterize the morphology of gold grains, (ii) quantify the nature and the amount of mineral micro-inclusions in gold native grains, detrital nuggets and "doré" (i.e. SEM and QEMSCAN analyses) and (iii) determine the chemical fingerprinting of minor and trace elements (i.e. EPMA and LA-ICP-MS analyses, respectively) for gold concentrates and "doré". Several gold deposits from different districts in the French Guiana have been investigated (e.g. St-Elie district). The first results show that the shape of gold grains helps to distinguish primary and eluvial/alluvial gold, and also illegal gold amalgamated by mercury. Furthermore, it is possible to discriminate the different districts by the identification of micro-inclusions contained in gold concentrates and "doré" (e.g. Bi inclusions are characteristic from the St-Elie district whereas Pb-Fe-As inclusions are specific of the Regina district). Results of in-situ chemical analyses show that the minor elements Ag, Cu and Hg and the trace elements Bi, Fe, Mg, Sb, Se, Pb, Pd, and Pt able to distinct the provenance of gold. Thus, chemical and mineralogical characteristics of gold ores seem to be a good proxy to trace the provenance of gold concentrates, but additional investigations are necessary to go further in the discrimination of the "doré", and consequently towards a better traceability of gold.

**Mots-Clés:** Gold, Fingerprinting, EPMA, ICP/MS ablation laser, Traceability

<sup>\*</sup>Intervenant

## Impact de l'eau sur la stabilité des carrières souterraines : corrélation avec les épisodes météorologiques de surface

Ghanem Ramadan <sup>1,2</sup>, Michel Dubois <sup>\*ψ1</sup>, Arnaud Gauthier <sup>1</sup>, Gaetan Cheppe <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) - EA 4515 (LGCgE) – Université de Lille - Sciences et Technologies - France

<sup>2</sup> Faculté de Génie-Civil, Université Al-Baath, CP 77 HOMS, Syrie (Université Al-Baath, Homs, Syrie) – Syrie

<sup>3</sup> Mairie de Lille – Mairie de Lille – France

La présence de carrières souterraines dans un contexte fortement urbanisé représente un risque non négligeable pour les populations riveraines et parfois un facteur limitatif pour les projets de construction. L'étude et l'inspection de ces vides est indispensable pour comprendre l'évolution des carrières et cerner les facteurs qui contribuent à leur dégradation au fil du temps. Parmi ces facteurs, le rôle de l'eau est tout à fait fondamental dans ces anciennes exploitations de craie.

La présente étude porte sur les anciennes carrières de la métropole lilloise. Les exploitations ont probablement débuté vers le XI-XIIème siècle. Elles sont de type " chambres et piliers " ou " catiches " (champs de chambres en forme de bouteilles), se situent entre 12 et 30 mètres de profondeur et ont permis l'extraction de la craie pour le chaulage, la construction de la plupart des bâtiments de Lille et la fabrication de chaux. Ces exploitations ont été intégrées au tissu urbain lors de son extension. Douze communes sont directement concernées et depuis peu, suivies par le Service Commun des Carrières Souterraines de la Ville de Lille, dont la création est récente. Cette étude a été réalisée sur les 40 dernières années pour recenser les incidents affectant la surface. Ces incidents regroupent l'ouverture de puits, les ruptures de piliers, tassements de terrain, vidange de puits, ... Une corrélation a été faite avec les épisodes de forte pluviométrie. Il apparaît que les incidents surviennent un ou deux mois après l'épisode de fortes précipitations.

**Mots-Clés:** carrières souterraines, incidents, pluviométrie

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: Michel.Dubois@univ-lille.fr

## Impact environnemental de l'industrie extractive : cas d'étude d'anciennes mines d'antimoine françaises

Vincent Thiery <sup>\*1</sup>, Arnaud Gauthier<sup>ψ2</sup>, Brunilda Rica

<sup>1</sup> Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai (IMT Lille Douai) – 941 rue Charles Bourseul, CS 10838, 59508 Douai Cédex – France

<sup>2</sup> Laboratoire de Génie-Civil et géo-Environnement (LGCGE) – Université Lille I - Sciences et technologies : EA4515 - building SN5, 59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX, France

L'extraction de l'antimoine en France, très active au cours de la première moitié du 20ème siècle, a laissé de nombreux sites miniers sur lesquels sont entreposés divers sous-produits de l'exploitation : stériles, résidus miniers, crassiers. Ceux-ci sont potentiellement des sources de relargage de l'antimoine, et des métaux associés, dans l'environnement. Dans la mesure où ce type de déchets miniers a pu être localement une source de granulats pour l'empierrement des chemins, la connaissance de leur typologie, de leur évolution et de leur stabilisation potentielle est d'un grand intérêt sociétal.

Deux cas d'étude dans le massif Central, un dans le district de Brioude-Massiac (filon des Anglais, Lubilhac, Haute-Loire), un à Mérinchal (Creuse), contribuent à une meilleure connaissance de ce type de déchets. La caractérisation minéralogique de ces déchets met en avant la présence de phases primaires (stibine, berthierite) et secondaires (oxydes, hydroxydes...). L'analyse chimique montre la présence de zinc, cadmium...

Les essais de lixiviation suivant la norme NF EN 12457-2 révèlent que de fortes teneurs en antimoine sont libérées parfois bien au-delà (jusqu'à plus de 5000 fois) des seuils réglementaires de 0,06 mg kg<sup>-1</sup> selon l'arrêté du 12 décembre 2014 relatif au stockage en installation de type ISDI.

Des essais de stabilisation en laboratoire sur ces déchets ont permis de réduire significativement les teneurs en Sb relarguées dans l'environnement.

**Mots-Clés:** antimoine, déchets miniers, stabilisation, lixiviation

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: Arnaud.Gauthier@univ-lille.fr

## Que nous apprennent les analyses des conflits dans la gestion et la localisation des déchets radioactifs quant au devenir des projets miniers en France ?

Veronique Thireau <sup>\*1</sup>, Carole Laverlochere <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Détection, évaluation, gestion des risques CHRONiques et éMERgents (CHROME) / Université de Nîmes (CHROME (EA 7352)) - Université de Nîmes : EA7352 - France

A l'instar de l'industrie nucléaire, l'industrie extractive est envisagée dans la sphère politique comme un pilier en devenir de l'industrie nationale tout à la fois réputée " stratégique ", pourvoyeuse d'emplois et de richesses, source de développement économique autant que d'indépendance nationale. Pourtant ce " renouveau " annoncé bruyamment par la création d'un comité stratégique en 2013 se heurte à trois sources de conflits potentiels qui ne sont pas sans rappeler les oppositions rencontrées en matière de gestion et de localisation des déchets radioactifs :

- L'une porte sur des considérations territoriales et d'occupation des sols donc d'organisation spatiale des activités et des hommes impliquant un voisinage avec des producteurs de piment d'Espelette, de fromage , de cerises ou de Côte du Rhône, ou plus simplement des riverains.
- La seconde intéresse les impacts sanitaires et environnementaux " acceptables " par les populations et les autres agents économiques, avec à la clé des coûts associés.
- Tandis que la troisième confronte des postures éthiques se réclamant dans un camp d'une foi en la Science, parfois alliée à la Nature, et dans l'autre de la confiance placée dans l'Homme, fusse t-il membre d'une génération " future ".

Afin d'avancer dans la compréhension des mécanismes à l'œuvre et imaginer des possibilités dynamiques de débats voire de gouvernance, il est utile de caractériser, dans une logique comparative, les structures et les modes d'organisation des confrontations à l'œuvre dans l'un ou l'autre cas. Les biens et services concernés répondent-ils aux mêmes caractéristiques économiques ? Les acteurs engagés sont-ils les mêmes ? Sont-ils dotés de moyens d'action similaires ? Font-ils état de stratégies et de pouvoirs différenciés ? Obtiennt-ils des résultats significatifs susceptibles d'invalider ou de modifier les stratégies opposées ?

La communication proposée vise donc, d'une part, à analyser les invariants mais aussi les différences dans les formes de conflits repérés à travers la documentation officielle (rapports, débats publics, permis...), les articles de presse disponibles dans les bases " standards " (Europresse, Factiva....), les sondages réalisés et les publications et autres sites d'opposants aux projets officiels (ISF-SystExt etc.). Elle doit permettre, d'autre part, d'envisager si les analyses proposées dans le domaine nucléaire et fondées sur les capacités de production et de diffusion de l'information par des manipulateurs de symboles peuvent être pertinentes et donc applicables dans le cas des enjeux miniers.

**Mots-Clés:** déchets radioactifs, information, pouvoir, mines

\*Intervenant

## Gestion durable des ressources minérales en Wallonie (Belgique) : informer et inventorier, sur des bases crédibles, pour décider raisonnablement

Johan Yans <sup>\*1</sup>, Daniel Pacyna <sup>ψ2</sup>, Jonathan Michel <sup>φ1,2</sup>

<sup>1</sup> Université de Namur - Département de Géologie (UNamur) - Belgique

<sup>2</sup> Service Géologique de Wallonie (SGW) - Belgique

La Wallonie s'appuie sur un très riche passé carrier et minier : silex, fluorite, fer, phosphates, minerais Calaminaire Pb-Zn, charbon, sont autant de ressources du sous-sol exploitées à travers le temps. Aujourd'hui, le secteur demeure productif avec plus de 150 carrières en activité, exploitant des calcaires, dolomies, sables, grès, argiles et porphyres. Ces matières entrent dans la fabrication d'une part substantielle de l'économie wallonne et forment la base d'un potentiel technologique innovant, rentable et générateur d'emplois diversément qualifiés.

Cependant, les carrières et les mines sont globalement perçues par l'opinion publique comme des lieux qui " polluent ", " sentent mauvais ", " détruisent le paysage ", " augmentent le charroi ", " alimentent le grand capital ", " tuent la flore et la faune ", exploitant des ressources géologiques par essence non renouvelables. Comment accepter/tolérer l'exploitation des matières premières géologiques, pourtant omniprésentes dans notre quotidien ?

La gestion durable et raisonnée des ressources du sous-sol, en Wallonie comme ailleurs devient une nécessité. Il est primordial d'informer, sans tabous, et d'éduquer le citoyen sur les contraintes et enjeux de la problématique. Rétablir des cours de géologie dans les écoles, favoriser la vulgarisation de cette matière dans tous les médias, sont des moyens structurels nécessaires pour permettre une conscientisation transgénérationnelle suffisante de l'opinion publique. La problématique de l'exploitation future est clairement transdisciplinaire : les approches géologiques, économiques, sociales, sociétales, politiques et environnementales sont à croiser, à toutes les échelles spatiales (commune, région, pays, continent, planète), pour divers acteurs. Cette transdisciplinarité doit se structurer sur des bases solides, incluant des experts dans les différentes thématiques.

En parallèle à cet immense travail d'information, établir un inventaire prospectif des ressources du sous-sol wallon et des alternatives d'approvisionnement constitue une base de travail crédible pour le citoyen, nécessaire pour l'administration, utile pour l'industriel et opportune pour le politique. Pour ce faire, le renforcement du service géologique wallon est requis. Cet organisme servirait de référence pour, notamment, conseiller le décideur politique et définir une stratégie publique claire en la matière.

**Mots-Clés:** ressources, informer, inventorier, stratégie publique, Wallonie

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: daniel.pacyna@spw.wallonie.be

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: jonathan.michel.ext@spw.wallonie.be

## Modélisation géomatique des données géophysiques aéroportées par la méthode des poids de l'évidence: Application à la cartographie du potentiel minéral en Sn-W et Métaux rares de la région de Laouni, Hoggar Central, Algérie

Hocine Zeghouane \*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> université de tizi ouzou - Algérie

<sup>2</sup> Université Mouloud Mammeri [Tizi Ouzou] (UMMTO) - Algérie

Dans le but d'évaluer rapidement et à moindre coût le potentiel minéral en Sn-W et métaux rares de la région de Laouni (Hoggar, Algérie), les données géophysiques aéroportées sur le magnétisme et la spectrométrie à rayon gamma ont été modélisées dans cette étude en utilisant une modélisation géomatique dénommée : Méthode des Poids de l'Evidence (Weights of Evidence method: WoFE).

Lors de l'application de cette méthode quantitative multicritère, les minéralisations déjà connues et associées aux granitoïdes à métaux rares (GMR) ont été utilisés comme points d'entraînement pour estimer l'importance relative de chaque évidence avec la minéralisation du type recherché.

La prédiction et localisation des zones potentielles en Sn-W et métaux rares a nécessité tout d'abord l'intégration dans un SIG des évidences géophysiques créées à partir des données spectrométriques (Uranium, Thorium, Potassium , Uranium / Potassium, Uranium / Thorium, Thorium / Potassium) et aéromagnétiques (Zones tampons des Structures Circulaires, Densité des structures circulaires, Anomalies Magnétiques réduites aux pôles et Susceptibilité magnétique), leur pondération en vue de sélectionner les meilleures d'entre elles et enfin leur combinaison via un modélisateur de données spatiales (Spatial Data Modeler: SDM).

Cette étude a permis d'acquérir en un temps record des résultats très satisfaisants, tant sur le plan quantitatif ou qualitatif : la carte du potentiel minéral ainsi obtenue montre plusieurs zones fortement favorables à l'accumulation des occurrences minérales du type recherché.

**Mots-Clés:** Géomatique, SIG, potentiel minéral, Poids de l'évidences, Métaux rares, Laouni, Hoggar, Algérie.

\*Intervenant



## 14.5. Géodynamique et systèmes minéralisés

## Relations tectonique salifère-minéralisations dans la région de Tébessa (Algérie nord-orientale)

Azzedine Bouzenoune \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Génie Géologique, Université Mohamed Seddik Benyahia de Jijel (Algérie) (LGG) - Algérie

L'une des caractéristiques du domaine atlasique des confins algéro-tunisiens est la présence de corps triasiques constituant les classiques "diapirs" de la zone des dômes. L'examen d'une carte de répartition des gîtes minéraux révèle une étroite relation spatiale entre ces corps triasiques et les sites minéralisés. Ces structures salifères et les "cap-rocks" qui leur sont souvent associés ainsi que les formations sédimentaires environnantes constituent un cadre géologique favorable pour la genèse des concentrations minérales.

La région de Tébessa recèle de nombreux sites minéralisés en Fe, Pb-Zn, Cu, Ba-Sr, F, P dont certains sont en exploitation (gisements de fer de l'Ouenza, Boukhadra et Khanguet el Mohad, gisements de phosphate du district de djebel Onk). Les minéralisations polymétalliques (Pb-Zn, Cu, Ba-Sr, F) sont toutes hydrothermales et sont principalement localisées dans des pièges paléogéographiques et/ou structuraux alors que les minéraux ferrifères (sidérites, ankérites et oxydes de fer) sont d'origine métasomatique en remplacement des roches carbonatées aptiennes. Les minéralisations phosphatées sont d'origine sédimentaire.

Les données géochimiques (inclusions fluides et isotopes stables) militent pour une mise en place polyphasée des minéralisations à partir de saumures chaudes (salinités 10-30 % équ. NaCl, températures 100-250°C). Les salinités relativement élevées s'expliquent par la contribution de l'halite des évaporites triasiques recoupée par sondage à partir de 100 m de profondeur. En l'absence de manifestation magmatique, les températures peuvent être liées à un gradient géothermique anormalement élevé induit par la bonne conduction thermique de ces extrusions salifères. La mise en mouvement halocinétique de ces évaporites triasiques pendant la période distensive du Mésozoïque et leur extrusion diapirique pendant les phases compressives néogènes constituent deux faits saillants de la tectonique salifère de cette région. Cette tectonique a eu des incidences sur les processus minéralisateurs en contrôlant la nature pétrographique de certaines roches encaissantes (faciès urgoniens de l'Aptien), en créant des pièges paléogéographiques (discordance vraconienne entre autres) et structuraux (diverses fractures) et en générant des gradients de P-T ayant participé au déclenchement des circulations et de l'expulsion des fluides minéralisateurs ainsi géopressurés de type "basinal brines" à l'image des gisements du Type Mississippi Valley, (MVT).

**Mots-Clés:** minéralisations, tectonique salifère, Tébessa

\*Intervenant

## Nouvelle approche du chemin P-T-t des fluides dans le gisement à W-Sn-Cu de Panasqueira (Portugal) : persistance d'une anomalie thermique d'origine profonde en cours d'exhumation

Michel Cathelineau <sup>\*1</sup>, Christian Marignac <sup>1</sup>, Marie-Christine Boiron <sup>1</sup>, Eleonora Carocci <sup>1</sup>,  
Jean-Marc Rolland <sup>1</sup>, Mélanie Dejean <sup>1</sup>, Maxime Dour <sup>1</sup>, Filipe Pinto <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de Lorraine, CNRS, CREGU, GeoRessources lab., F-54518, Vandoeuvre-lès-Nancy, France

<sup>2</sup> Beralt Tin and Wolfram, S.A. Barroca Grande 6225-051. Portugal – Portugal

Le gisement de classe mondiale à W-Sn-Cu de Panasqueira (ClZ) est formé de veines sub-horizontales à Qtz-Wfm-Cst-Ms-Toz-sulfures. Son histoire est caractérisée par la superposition d'événements hydrothermaux successifs, accompagnée par des phénomènes de dissolution-recristallisation affectant la plupart des minéraux. Le quartz précoce (associé au dépôt majeur de wolframite) est particulièrement affecté, de larges portions des premiers cristaux ayant perdu toutes traces des événements précoces. Les inclusions fluides (IF) précoces ont dans une large mesure subi une décrépitation à un moment de l'histoire du gisement qui semble être contemporain du principal stade de dépôt des sulfures, ce qui confirme partiellement les observations de Jaques et al. (2017). La plupart des IF actuellement observées ont été piégées au cours des stades tardifs. Ce sont malheureusement celles qui ont été étudiées dans tous les travaux antérieurs (Kelly and Rye 1979, Bussink 1984, Polya et al. 2000, Lourenço 2002), y compris les plus récents (Lecumberri-Sánchez et al. 2017), ce qui signifie que les fluides précoce et les conditions P-T de leur circulation restent à ce jour méconnues.

Dans l'entourage des IF décrépitées, il existe toutefois de petites IF appartenant au système C-O-H-N (IF Lw-c), avec une salinité modérée, dont les isochores permettent une première estimation des conditions P-T au stade du dépôt de la wolframite, à c. 450 [± 50]°C et c. 270-300 MPa (pression lithostatique : profondeur ~ 10-12 km).

Vers la fin de l'histoire, se développe un stade à (Li-Fe)-Ms-Apy-Cst-Ap caractérisé par le développement pénétratif de la Ms aux dépens du quartz dissous, et c'est à ce moment que se forment la plupart des IF mesurables. Ce sont le plus souvent des IF Lw-c (CO<sub>2</sub> > CH<sub>4</sub> > N<sub>2</sub>) homogénéisant autour de 300°C. Plus rares, des IF purement volatiles (CH<sub>4</sub> > N<sub>2</sub> > CO<sub>2</sub>), contemporaines des IF Lw-c, homogénéisent en phase liquide à -85°C. On en tire une estimation robuste des conditions P-T au stade du dépôt de la Cst, à c. 400 [± 50]°C et 140 ± 20 MPa (profondeur c. 5.3 ± 0.1 km), ce qui atteste d'un gradient géothermique élevé (c. 75 ± 10°C.km<sup>-1</sup>) et donc de l'existence d'une advection thermique (intrusion granitique?).

Les datations réalisées sur rutile et muscovite indiquent plus de 15 Ma d'activité hydrothermale (Carocci et al., RST Lille), ce qui est à lier à une série locale d'intrusions granitiques, à relier avec une zone de fusion partielle plus profonde (migmatites). Ceci indique la permanence d'une anomalie thermique crustale de longue durée, synchrone de l'exhumation. Ceci est attesté par l'évolution de pression lithostatique qui témoigne d'une remontée des séries depuis des profondeurs de l'ordre de 12 km jusqu'à 3-5 km.

**Mots-Clés:** Panasqueira, fluides, tungstène, étain, pression, température, exhumation, anomalie thermique

## Minéralisation sulfurée en nickel-cuivre des dépôts de Samapleu du complexe mafique-ultramafique Yacouba - ouest de la Côte d'Ivoire (futur premier gisement de Nickel-Cuivre de l'Afrique de l'ouest)

Franck Gouedji <sup>\*ψ1</sup>, Christian Picard <sup>2</sup>, Marc Antoine Audet <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Man (Uman) - Côte d'Ivoire

<sup>2</sup> Université de Franche-Comté - UMR 6249 - France

<sup>3</sup> samaresources - Canada

Le complexe mafique-ultramafique Yacouba, situé en Côte d'Ivoire dans la région de Biankouma - Sipilou, a été découvert lors des travaux d'exploration minière menés depuis 2009 par la société Sama Nickel-CI. Ce complexe appartenant au craton ouest-africain, est intrusif dans domaine Kenema-Man (3,6-2,7 Ga). Il s'étend de manière discontinue dans un couloir d'environ 30 kilomètres de longueur sur une dizaine de kilomètres de largeur et comprend deux unités : un corps principal, complexe stratifié, constitué de gabbro-norite, de diorite, d'anorthosite à hypersthène avec de la magnétite; et des intrusions ultramafiques à mafiques de plus petite taille dont les intrusions de Samapleu. Les intrusions de Samapleu, hôtes de la minéralisation sulfurée d'intérêt économique, sont composées de péridotite, de pyroxénite, de gabbro-norite et d'anorthosite. Ces intrusions datées de 2,09 Ga qui proviennent du manteau, auraient été établies autour de 22 km de profondeur dans les granulites archéennes (2,78 Ga) qui, au moins, les ont partiellement contaminés. Cette minéralisation est caractérisée par la présence de sulfures de nickel, de cuivre et de minéraux du groupe du platine. La minéralisation sulfurée (principalement pyrrhotite, pentlandite, chalcopyrite +/- pyrite) est principalement disséminée avec par endroits, des veines de sulfures semi- massives à massives. Elle est particulièrement abondante dans les horizons de pyroxénite avec des textures en filets ou bréchiques, indiquant une précipitation après cristallisation du pyroxène. L'estimation révisée des ressources minérales du gisement Samapleu comprend une ressource minérale indiquée de 14,1 millions de tonnes titrant 0,24% de nickel et 0,20% de cuivre, ainsi qu'une ressource minérale inférée de 26,5 Mt titrant 0,24% de nickel et 0,18% de cuivre (site Web Sama Resources - 2017). Les rapports isotopiques du soufre, mesurés sur les différents types de sulfures, indiquent une source mantellique. De plus, l'estimation du R-facteur entre 1500 et 10000 suggère une production relativement faible de liquide sulfuré par rapport au volume de magma silicaté. Ainsi, l'hypothèse la plus probable est que la formation du liquide sulfuré s'est produite par immiscibilité du magma mantellique silicaté en relation avec les conditions de mise en place des intrusions et l'éventuelle modification géochimique du magma par assimilation de la croûte continentale environnante. Le liquide sulfuré dense, après formation, aurait migré à travers un système de fracturation "hydraulique" à l'origine des structures bréchiques observées.

**Mots-Clés:** archéen, paléoproterozoïque, côte d'ivoire, complexe yacouba, dépôt de nickel, cuivre de samapleu.

## Using geological and high-resolution aeromagnetic data to characterize crustal fault across the Ediacaran-Cambrian transition of northeastern Saghro massif (Eastern Anti Atlas, Morocco)

Younes Hejja <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Lahssen Baïdder <sup>2</sup>, Abdellah Nait Bba <sup>1</sup>, Mustapha Boujamaoui <sup>3</sup>, Ahmed Manar <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Hassan II University, Faculty of Sciences Aïn Chock, Geosciences Laboratory, BP 5366 Maarif, Casablanca, Maroc

<sup>2</sup> LG - Laboratoire Géosciences, Université Hassan II-Casablanca, BP 5366 Maârif, Casablanca, Maroc

<sup>3</sup> URGGFS, Département de la géologie, Faculté des Sciences et techniques, Errachidia - Faculté des Sciences et Techniques Errachidia - Université Moulay Ismail. BP 509, Boutalamine, 52000 Errachidia, Maroc

<sup>4</sup> Geology Direction, Ministry of Energy, Mines and sustainable development, Rabat, Maroc

The Late Ediacaran-Cambrian transition of the Moroccan Anti-Atlas considered one of the great metallogenic province and still the object of active geological discussion. The good exposure of geological outcrop in this region makes it particularly suitable to test the role of subsurface fault in basement-cover interaction. To attend this aim we have used high resolution aeromagnetic data integrated with one detailed mapping conducted in the field. multiple fundamental processing were applied to aeromagnetic data such as the reduction to pole, Horizontal gradient, the analytic signal, the tilt-angle and the Euler deconvolution. The analysis of aeromagnetic data shows that the studied area is crossed by numerous trending lineaments with a dominant NE system. The structural map generated from aeromagnetic data reveals some unknown and several previously known geological lineaments. Our outcrop analysis reveals that the network fractures that affects the Ediacaran-Cambrian transition shows NE to E-trending faults. The main crustal fault shows polyphased kinematics related to the tilting block during late Ediacaran-Early Paleozoic extensional events reactivated during regional Variscan strike-slip tectonics. The result of this present study can guide us to reconstitute the structural analysis at the regional scale and to understand the architecture and overprinting relationships between the Precambrian basement and its folded cover in the Saghro massif.

**Mots-Clés:** Ediacaran, Cambrian, aeromagnetic, crustal fault, Saghro massif, Eastern Anti Atlas, Morocco.

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>✉</sup>Auteur correspondant: youneshejja@gmail.com

## Trois épisodes minéralisateurs distincts dans l'orogenèse varisque responsables de la précipitation de trois types de wolframites aux alentours du complexe granitique de Colettes/Beauvoir (Allier) ?

Loïs Monnier <sup>\*1</sup>, Stefano Salvi <sup>1</sup>, Didier Beziat <sup>1</sup>, Olivier Vanderhaeghe <sup>1</sup>, Jérémie Melletton <sup>2</sup>, Laurent Bailly <sup>2</sup>, Philippe Lach <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) - Université Paul Sabatier - Toulouse III - Observatoire Midi-Pyrénées 14 Avenue Edouard Belin 31400 Toulouse, France

<sup>2</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières - France

La mise en évidence de 2 nouvelles générations de wolframite (3 au total) dans la zone périphérique des granites de Colettes/Beauvoir permet d'établir une succession paragénétique plus complète que celle décrite par Cuney et al. (1992), concernant les minéralisations en W dans la nappe de la Sioule. Le recoupement avec les datations, les données Pressions-Températures, les évidences de terrain (recoupement et altérations), permettent de distinguer les trois événements suivants :

Stade pré-tectonique : Mise en place de veines de quartz du stockwork de la Bosse, transposées dans la foliation des schistes encaissants, et précipitation d'une wolframite a. Cet épisode pourrait être accompagné d'une précipitation massive de tourmaline et d'ilménite dans l'encaissant. La mise en place des systèmes équivalents est considéré de faible profondeur (< 6 km). Différentes textures et recoupements indiquent que cet épisode est le plus ancien identifié dans le secteur.

Stade syn-métamorphique : Topazification massive du stockwork et cristallisation d'une wolframite b à  $333 \pm 2,4$  Ma (Harlaux et al 2017 ; U-Pb sur wolframite) durant le pic de métamorphisme Viséen affectant l'unité de la Sioule daté à  $\sim 335$  Ma (U-Pb sur monazite) par Do Couto et al (2015). La température estimée de cet événement est de l'ordre de 500°C pour une pression mal contrainte dans le micaschiste encaissant.

Stade tardi-orogénique : Episode Colettes/Beauvoir à  $\sim 310$  Ma. (Cheilley et al 1992 ; Melletton et al 2015). Le fluide orthomagmatique entraîne la cristallisation de la wolframite c associée à des apatites bleues aux abords de Beauvoir alors que la wolframite c précipite également dans des veines de quartz régionales (Suchot, Mazet). Ces deux granites se mettent en place à faible profondeur (< 3 km ; Cuney et al 1992). Ces trois minéralisations dans le même district de Colettes/Beauvoir constituent un exemple métallogénique exceptionnel (unique ?) enregistrant l'évolution de l'histoire orogénique varisque depuis l'accrétion tectonique jusqu'à l'effondrement de la chaîne.

**Mots-Clés:** orogenèse varisque, tungsten, granite de Beauvoir

\*Intervenant

## La minéralisation aurifère filonienne du Plateau de l'Assaladou (Ariège, Pyrénées, France)

Marguerite Munoz <sup>\*ψ1</sup>, Olivier Vanderhaeghe <sup>1</sup>, Guillaume Estrade <sup>1</sup>, Gaétan Link <sup>1</sup>, Didier Beziat <sup>1</sup>,  
Clément Vitry <sup>1</sup>, Déodat Alindawa <sup>1</sup>, Stefano Salvi <sup>1</sup>, Michel De Saint Blanquat <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Geosciences Environnement Toulouse (GET) – UMR 5563 CNRS – Observatoire Midi-Pyrénées, 14 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

L'activité d'orpaillage est connue depuis longtemps en Ariège. Concernant l'or primaire qui pourrait en constituer la source, des études archéologiques ont décrit de petites exploitations en galeries et tranchées à l'époque romaine sur le plateau de l'Assaladou (1585 m d'altitude) situé à 3 km au nord-est d'Ax-les-Thermes. Une prospection par sondages y a été effectuée par le BRGM en 1986. Des teneurs en or allant jusqu'à 30,9g/t ont été rapportées.

La minéralisation sulfurée aurifère est encaissée dans la série métá-sédimentaire du cambro-ordovicien de la zone axiale des Pyrénées dominée par des schistes alternant avec des marbres affectés par une déformation polyphasée et un gradient métamorphique de HT/BP. Trois épisodes filoniens successifs à sulfures et or natif ont été identifiés : le premier associé à une veine de quartz gris de puissance métrique, le second associé à une veine de quartz blanc, également de puissance métrique, postérieure à la précédente (des veinules de quartz blanc recoupent le quartz gris), toutes deux étant transposées dans la foliation principale varisque faiblement pentée vers le Nord; le troisième épisode correspond à de petites veinules sécantes sur les deux épisodes précédents. La paragénèse sulfurée dans les trois types est principalement constituée d'arsénopyrite parfois associée à la pyrite, avec galène et ménéghinite (Pb<sub>13</sub>Cu<sub>3</sub>Sb<sub>7</sub>S<sub>24</sub>) plus rares. L'or se présente essentiellement sous forme de grains libres, parfois visibles à l'œil nu, généralement dans le quartz mais aussi en inclusions dans l'arsénopyrite. La teneur en argent varie de 10.9 à 36.5 %. La composition de l'arsénopyrite précoce indiquerait une température de précipitation entre 360 et 470°C.

La microstructure du quartz gris est caractéristique du fluage-dislocation à une température d'environ 350-400°C ce qui est cohérent avec les associations muscovite-chlorite dont l'orientation préférentielle souligne la schistosité de ces veines et indiquant une température de cristallisation comprise entre 375 et 400°C. Le quartz des veinules sécantes n'a pas subi de recristallisation ce qui traduit un régime fragile, avec des températures inférieures à 200°C.

L'ensemble des données acquises suggèrent que la minéralisation aurifère de l'Assaladou, localisée dans une zone de cisaillement faiblement pentée, serait associée à une déformation progressive passant de ductile à fragile et déposée à partir de fluides métamorphiques à la fin de l'orogénèse hercynienne.

**Mots-Clés:** Ariège, or, arsénopyrite, quartz, filons, déformation, tardihercynien

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: marguerite.munoz@get.omp.eu

## Minéralisations ferrifères à sidérite tardihercyniennes et posthercyniennes dans les Pyrénées Orientales : nouvelles données pétrostructurales et géochimiques

Thibault Roattino <sup>\*ψ1</sup>, Marguerite Munoz <sup>1</sup>, Gaétan Link <sup>1</sup>, Olivier Vanderhaeghe <sup>1</sup>,  
Guillaume Estrade <sup>1</sup>, Didier Beziat <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) - Institut de Recherche pour le Développement, Université Paul Sabatier - Toulouse 3, Observatoire Midi-Pyrénées, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5563 – France

Les massifs du Canigou et des Aspres font partie de la zone axiale pyrénéenne et recèlent nombre de gisements polymétalliques, principalement exploités pour le fer, mais aussi certains pour le fluor et l'or. Ces minéralisations, encaissées dans une série de schistes et de marbres, sont organisées en plusieurs paragenèses qui pourraient être issues de différents phénomènes minéralisateurs intervenus au cours des cycles orogéniques ayant structuré la zone axiale des Pyrénées Orientales. Dans chacune des paragenèses, la sidérite – Fe(CO<sub>3</sub>) – est le principal minéral porteur de fer. Cette étude a permis de distinguer les gisements sur la base de leurs positions structurales à l'échelle régionale, et des caractéristiques texturales, microstructurales et géochimiques de la sidérite et de les relier à un cadre géodynamique. Ces données mettent en lumière deux événements majeurs de dépôt.

Le premier est à l'origine de la minéralisation filonienne sulfuree aurifère des Aspres, à sidérite précoce. Cette sidérite est enrichie en terres rares lourdes. Les microstructures de la sidérite et du quartz, boudinés dans la schistosité, mettent en évidence une déformation cisaillante ductile à environ 400 à 500 °C. Cette minéralisation se serait mise en place dans des fentes de tension, et aurait ensuite été transposée dans la schistosité lors de la déformation décrochante tardihercynienne.

Le second événement correspond aux minéralisations de fer de Batère, et aux minéralisations de fer associé au fluor de La Coume et de Fillols. Elles sont majoritairement développées dans l'encaissant carbonaté autour du Canigou. La sidérite se distingue par une composition légèrement enrichie en terres rares légères et par des textures témoignant d'une déformation cassante au maximum cataclasique : cristaux en remplissage de veines non déformés à Fillols, mais aussi minéraux broyés dans des cataclasites à La Coume, ainsi que clastes et ciment de brèches avec développement de minéralisation par métasomatose dans les carbonates encaissants à Batère.

Ainsi ces gisements, qui n'ont pas subi la déformation hercynienne, sont à relier au cycle alpin et probablement à l'activité du chevauchement des Aspres pendant l'orogénèse alpine pour la minéralisation de La Coume, au système de failles oligocènes de la Têt pour la minéralisation de Fillols, et de failles postérieures pour celle de Batère.

**Mots-Clés:** Métallogénie, Fe, Au, F, Sidérite, Terres Rares, Géodynamique, Pyrénées Orientales

## Control of deformation on pegmatitic mineralization of Cap de Creus, Spain

Julien Serrano <sup>\*ψ1</sup>, Marieke Van Lichtervelde <sup>φ</sup>, Michel De Saint-Bланquat <sup>§</sup>, Elena Druguet

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – Institut de Recherche pour le Développement, Université Paul Sabatier - Toulouse 3, Observatoire Midi-Pyrénées, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5563 – France

The Cap de Creus area is a strategic zone to investigate rare-element pegmatite-hosted mineralization in relation with the structural context of pegmatite emplacement. The area offers an exceptional outcrop quality and its geological context, both in terms of deformation events and pegmatite mineralogy, is well constrained. The area is characterized by a pegmatite field of more than 400 bodies that evolve from the least to the most differentiated in parallel to the metamorphic grade and deformation intensity of the country rock. In the most deformed and high-metamorphic (sillimanite grade) units, migmatitic zones are adjacent to poorly-evolved, biotite-garnet-tourmaline-sillimanite-cordierite-rich pegmatites, whereas the least deformed and low-metamorphic (chlorite-muscovite) units host few but highly-mineralized (phosphate-Nb-Ta-Sn oxides) pegmatites of the LCT rare-element class. The diversity and richness of phosphate parageneses are particularly striking in the Cap de Creus pegmatites. The present study provides a structural, petrological and geochemical investigation of the different pegmatite types in relation with the structural deformation of their country rocks. It reveals that the most mineralized/differentiated pegmatites are the more deformed and were emplaced in the early stages of the major deformation event D2, whereas the most simple, undeformed, and least differentiated were emplaced late during D2. Considering that D2 is synchronous over the whole area, it implies that the most differentiated pegmatites were emplaced earlier than the least fractionated, which can only be explained by an anatetic origin of the pegmatites: the first segregated melts generated by low degrees of partial melting were the most evolved and travelled farther from their source compared to late anatetic melts. Furthermore, the exceptional phosphorus enrichment found in early dykes cannot be explained by melt differentiation alone, but the occurrence of phosphate veins in the pegmatites as well as apatite in the country rock suggests an hydrothermal overprint - probably driven by the D2 deformation event - to that remobilized P together with B as evidenced by hydrothermal quartz+tourmaline veins. It implies that the regional deformation probably played a role in the distribution of mineralization in time and space.

**Mots-Clés:** Deformation, Mineralization, pegmatite

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: julien.serrano@get.omp.eu

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: marieke.vanlichtervelde@get.omp.eu

<sup>§</sup>Auteur correspondant: michel.desaintblanquat@get.omp.eu

## Relations fluides-fracturation en contexte d'extension: exemple des minéralisations à Baryte du Bassin Aquitain au Jurassique supérieur

Pierre Strzerynski <sup>\*1</sup>, Louise Lenoir <sup>1,2</sup>, Paul Bessin <sup>1</sup>

<sup>1</sup> L.P.G - Le Mans - CNRS : UMR6112, Le Mans Université - France

<sup>2</sup> Géosciences Paris Sud (GEOPS) - Université Paris-Sud - Paris 11, CNRS : UMR8148 - France

En bordure des bassins sédimentaires, les premiers dépôts forment souvent des gisements d'importance économique (e.g. Pb-Zn pour les gisements de type Mississippi). Le mécanisme à l'origine de ces gisements implique des fluides expulsés depuis le centre du bassin et circulant à la base du bassin, en dessous d'un niveau imperméable.

Des gisements de ce type, à barytine et fluorine, sont connus au niveau de la bordure nord du Bassin aquitain (France). Les minéralisations se sont formées au Jurassique supérieur dans un contexte d'extension N-S marqué par le début de l'individualisation des sous bassins de Parentis et de Charentes. Les niveaux minéralisés et imperméables sont datés du Jurassique inférieur. Les études géochimiques ont mis en évidence le mélange de trois fluides à l'origine de ces minéralisations : i) un fluide d'origine diagénétique issu du centre du bassin, ii) un fluide plus chaud provenant du socle hercynien et iii) un fluide possédant la signature géochimique de l'eau de mer.

Dans le secteur de Jard-sur-Mer, ces minéralisations ont aussi été reconnues dans les niveaux du jurassique Moyen suggérant que les fluides minéralisateurs ont traversés la couche imperméable. Afin de mieux contraindre les relations entre les fluides et les structures tectoniques, nous avons réalisé une étude structurale du socle et de la couverture sédimentaire.

Les résultats mettent en évidence un découplage mécanique entre socle et couverture sédimentaire. Dans cette dernière, l'orientation des veines et des failles traduit une phase d'extension N-S contemporaine des circulations de fluides. Du haut vers le bas de la série sédimentaire, le pendage des failles normales diminue jusqu'à devenir listrique au niveau de la discordance. Dans le socle, ce sont des failles normales, héritées de la fin de l'orogénèse hercynienne, qui drainent les fluides. Dans le niveau minéralisé, un réseau de veines à la fois verticales et horizontales évolue localement en brèches hydrauliques. L'ensemble est compatible avec la mise en surpression des fluides dans le niveau minéralisé et le découplage mécanique du socle et de la couverture sédimentaire.

Nous proposons que l'origine de ce découplage soit liée à la tectonique distensive du Jurassique supérieur : L'accumulation de sédiments au centre du bassin permet la mise en mouvement des fluides d'origine diagénétique et la fracturation du socle permet également la mobilisation de fluides profonds le long de structures héritées.

**Mots-Clés:** Bassin aquitain, fracturation, surpression fluide, extension

\*Intervenant



## **15. GRANDS PROGRAMMES – GRANDS PROJETS**



## 15.1. RGF Référentiel Géologique de la France

## The deep structures of the Alpine arc: a review of the CIFALPS experiment

Stéphane Guillot <sup>\*1</sup>, Liang Zhao <sup>2</sup>, Anne Paul <sup>1</sup>, Marco Giovanni Malusà <sup>3</sup>, Stefano Solarino <sup>4</sup>,  
 Elena Eva <sup>5</sup>, Stephane Schwartz <sup>1</sup>, Coralie Aubert <sup>1</sup>, Thierry Dumont <sup>1</sup>, Silvia Podrelli <sup>7</sup>, Lyu Chao <sup>1</sup>,  
 Simone Salimbeni <sup>5</sup>, Helle A. Pedersen <sup>1</sup>, Qingchen Wang <sup>2</sup>, Xiaobing Xu <sup>2</sup>, Tianyu Zheng <sup>2</sup>,  
 Rixiang Zhu <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre, , Univ Grenoble Alpes, Université Savoie Mont Blanc, CNRS : UMR5275 / <sup>2</sup> State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Beijing - Chine / <sup>3</sup> Univ of Milano-Bicocca, Earth and Env. Sci. - It/ <sup>4</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Centro Nazionale Terremoti, c/o DICCA University of Genoa, Italie / <sup>5</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulc., Sez. Bologna, It

The combination of the CIFALPS results with the data collected from broadband seismic stations at the scale of the entire alpine arc is an opportunity to integrate seismological observations into a single model of the western Alpine region. The P receiver function technique from the CIFALPS experiment provides the first seismic evidence for European continental crust at 75 km depth (Zhao et al., 2015). Array analysis of seismic surface waves along the CIFALPS profile provides a 2-D Vs model confirming the eastward-dipping of the approximately 100 km thick European lithosphere (Lyu et al., 2017). The Vs is quite homogeneous and lower than 4.0 km.s<sup>-1</sup> suggesting that the lower crust beneath the western Alps is dominantly felsic. Eastward, beneath the internal Alps, Vs increases up to 4.2 km.s<sup>-1</sup>. compatible with the progressive eclogitization of a dominant felsic lower crust (Solarino et al., 2018). Local earthquake tomography points to a composite structure of the mantle wedge above the subducted European lithosphere. We show that the Dora-Maira (U)HP dome lays directly above partly (50 to 75%) serpentized peridotites documented from ~10 km depth down to the top of the eclogitized lower crust. Relocalisation of deep earthquakes along the CIFALPS profile (Malusà et al., 2017) shows that the partly serpentized Ivrea body juxtaposed against the dry mantle peridotites of the Adriatic upper plate along an active fault rooted in the lithospheric mantle. At the broad alpine scale, high-resolution P-waves tomography (Zhao et al., 2016) document the lateral continuity of the European slab from the western Alps to the central Alps, and the down dip slab continuity beneath the central Alps, ruling out the hypothesis of slab break off. A low-velocity anomaly is observed in the upper mantle beneath the core of the western Alps. This low-velocity P-waves anomaly is also observed in the 2-D Vs model (Lyu et al., 2017). The combination of this low-velocity anomaly with seismic anisotropy analysis and geodetic data points to a dynamic topography effects potentially driven by lateral asthenospheric mantle influx driven by the rollback of the Apenninic slab. Beneath the Eastern Alps, a NE dipping Adriatic slab, consistent with Dinaric subduction. A north south tear fault coinciding at the surface with the Judicarian fault, accommodates opposite-dipping subductions during Alpine convergence. To the south of the alpine arc, the laterally continuous Adriatic slab shows major gaps at the boundary with the Southern Apennines and becomes near vertical in the Alps-Apennines transition zone suggesting that the Apennine slab is bent by Alpine slab (Zhao et al., 2016). Seismic anisotropy analysis show that the resulting mantle flow pattern was characterized by an asthenospheric counterflow at the rear of the unbroken western Alps slab and around its southern tip (Salimbeni et al., 2018). **Mots-Clés:** alps, Apennines, tomography, subduction, slabs

## RGF Chantier Pyrénées – mise en cohérence des formations superficielles à l'échelle de 1/50 000 : méthodologie et perspectives

Hélène Tissoux <sup>\*1</sup>, Caroline Ricordel-Prognon <sup>1</sup>, Frédéric Lacquement <sup>1</sup>, Magali Delmas <sup>2</sup>,  
François Prognon <sup>1</sup>, Anne Bialkowski <sup>1</sup>, Julien Bernard <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) – Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) –  
3 avenue Claude Guillemin BP 36009 45060 ORLEANS Cedex 2, France

<sup>2</sup> Histoire naturelle de l'Homme préhistorique (HNHP) – Museum National d'Histoire Naturelle, Université de  
Perpignan Via Domitia, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7194 – France

Dans le cadre du premier chantier du Référentiel Géologique de la France (RGF), la géologie des Pyrénées françaises a été revisée, actualisée et synthétisée par des spécialistes thématiques et régionaux du BRGM et du monde académique. L'objectif était d'aboutir à la constitution d'une couverture continue, homogène et cohérente des connaissances géologiques actuellement disponibles sur les Pyrénées.

À l'issue des travaux, une carte numérique des formations de surface (ou régolithe) a été réalisée à partir des 60 cartes géologiques au 1/50 000 publiées par le BRGM. Également établie au 1/50 000, elle est associée à une base lithostratigraphique hiérarchisée dans laquelle chaque unité lithostratigraphique possède un parent et est associée à une lithologie dominante et des âges de début et fin. Pour cela, des lexiques lithologiques et chronologiques de référence ont été établis en parallèle.

Les travaux d'expertise ont consisté à:

- Redéfinir les attributions lithostratigraphiques de nombreux polygones;
- Mettre en cohérence les contours d'objets géologiques initialement représentés sur plusieurs cartes voisines mais publiées parfois par des équipes ou à des époques très différentes.
- Harmoniser la chronologie des dépôts fluviaux (F) et fluvioglaciaires (FG) à l'échelle du bassin-versant, en respectant la continuité longitudinale et latérale des dépôts, à partir de données issues de la littérature, des notices et de travaux masters "RGF". Localement, les dépôts fluviaux pléistocènes ont été largement redessinés (vallée de la Têt et de l'Ariège) grâce au travail de cartographie et de datations des collaborateurs RGF. À ce jour, seules quelques incohérences persistent et nécessiteront des investigations complémentaires.

La carte RGF ainsi réalisée reflète l'état actuel des connaissances pour les formations de surface dans les Pyrénées. Son format numérique associé à une base de données hiérarchisée et déclinable selon l'âge des dépôts et leur lithologie la rend particulièrement flexible et adaptable à des besoins variés. Par exemple, elle peut être un appui intéressant pour quantifier les flux sédimentaires 'Source to Sink' en facilitant l'estimation des volumes sédimentaires exportés dans un bassin-versant et en indiquant leur temporalité.

**Mots-Clés:** RGF, cartographie, régolithe, formations de surface

<sup>\*</sup>Intervenant



## **15.2. PICG - Global Change and the Evolution of Life: Evidence from the Geological Record**

## Sedimentological and geochemical proxies as indicators of environmental changes in shales of the suboxic facies in the Devonian of the Pyrenees (France)

Elise Nardin <sup>\*1</sup>, Markus Aretz, Benoît Issautier, Philippe Negrel

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) – CNRS : UMR5563 – OMP, 14 Avenue Edouard Belin 31400 Toulouse, France

The Devonian is a period of significant changes in marine and terrestrial ecosystems. A total of 16 events is identified, of which seven are dated from the Upper Devonian. The three major events, the Rhinestreet (mid Frasnian), the Kellwasser (late Frasnian) and the Hangenberg (lastest Famennian), are associated with phases of drastic decreases in marine diversity. The deposits most commonly associated with such events are black shale to dark organic-rich limestones and siltstones layers reflecting transgressive pulses and geochemical perturbations.

This study extends recognition of the Rhinestreet event to south France, in the northern flanc of the Pyrenees, for the first time. The investigated area is a Griotte limestone quarry, located in the central part of the Pyrenees, France, approximately 0.5 km west of the village of Cierp-Gaud (Haute-Garrone, Occitanie, France). This Upper Devonian deposit is composed by over 40m of massive red, brown or white mudstone to wackestone limestone. The considered interval in this study is situated at the lower part of the section, represented by around 80cm of black shales and black calcisiltstones which correspond to the Punctata zone, inserted into a carbonate succession. The underlying section is composed of grey wackestones organised in relatively thin beds whereas the overlying succession is composed of pseudonodular limestones (mostly mudstones), corresponding to the Griotte Facies. The depositional environment has been interpreted as a storm-dominated outer ramp, with constant regular continental influx.

Twenty-four samples were collected through the study section and a total of seventeen thin-sections were realized for microfacies analysis. Eighteen rock samples selected for geochemical analyses (stable isotopes and major and trace elements).

Preliminary results reject anoxic conditions in the Central Pyrenees, contrarily to the classical interpretation of this event in Europe. However, some elements (e.g., copper, nickel, sulphur) suggest an enhanced weathering leading to a higher primary productivity, combined to a possible local hydrothermal source

**Mots-Clés:** geochemistry, sedimentology, devonian, pyrenees

<sup>\*</sup>Intervenant



## **15.3 Restitution des projets TELLUS CNRS-INSU**

## Magnetic and electrical imaging of a vapor-dominated hydrothermal area in Yellowstone National Park, USA

Claire Bouligand <sup>\*1</sup>, Shaul Hurwitz <sup>2</sup>, Jean Vandemeulebrouck <sup>1</sup>, Svetlana Byrdina <sup>1</sup>,  
Mason Andrew Kass <sup>3</sup>, Jennifer Lewicki <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) – Université Grenoble Alpes, Université Savoie Mont Blanc, CNRS : UMR5275, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR219, IFSTTAR, Université Savoie Mont Blanc – Fr

<sup>2</sup> U.S. Geological Survey (USGS) – États-Unis

<sup>3</sup> Aarhus University [Aarhus] – Danemark

In vapor-dominated systems, steam and gas ascend from a deep boiling water reservoir through a narrow conduit. Condensation beneath a near-surface low-permeability cap layer results in gravity-driven liquid water descent through fractures. The entire structure forms a very efficient heat exchanger called "heat pipe". In this study, we investigate a vapor-dominated system in the Solfatara Plateau Thermal Area (SPTA) near the northern rim of the Yellowstone Caldera. The SPTA is a basin of cemented glacial deposits within a rhyolite flow. We combine magnetic, electromagnetic and electrical methods to image the structures that facilitate hydrothermal flow, the geometry of the heat pipe and the distribution of hydrothermal alteration. Inversion of magnetic data and transient-electromagnetic soundings provide information on the depth and geometry of the basin and its adjacent younger part of the ~100 ka Solfatara Plateau flow. Our conceptual model suggests that the steam plume forms following discharge of pressurized fluids flowing at the brecciated base of the younger flow into the basin with higher permeability deposits where decompression results in boiling and steam separation. Our 3-D model of electrical conductivity shows a narrow conductive body interpreted as a heat pipe, which coincides at the surface with heat and CO<sub>2</sub> flux maxima. Results from the magnetic survey and superficial magnetic susceptibility measurements indicate that destruction of magnetic minerals mainly occurs in the shallow subsurface, where acid-sulfate water dissolves magnetic minerals. The first-order components of the proposed conceptual model for the SPTA were reproduced by numerical modeling. Results from this study are probably applicable to other vapor-dominated systems in Yellowstone and elsewhere.

**Mots-Clés:** Magnetic methods, Electrical methods, Hydrothermal systems, Hydrothermal alteration

<sup>\*</sup>Intervenant

## The seismic cycle in the subduction zone of the Ryukyus : preliminary study from marine terraces and microatolls observation

Nathalie Feuillet <sup>\*1</sup>, Sophie Debaecker <sup>\*1</sup>, Jean-Marie Saurel <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) – Institut national des sciences de l'Univers, IPG PARIS, Université Paris Diderot - Paris 7, Université de la Réunion, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7154, France

The Ryukyu subduction zone (southern Japan) accommodates the northwestward convergence between the Eurasian and Philippines Plates at rate of ~7 cm/yr. Although it has been recognized as a potential source of substantial seismic and tsunami hazard, only two historical earthquakes have been reported in this region in 1771 (M8+) and in 1911 (M8). In this area the coupling rate of the interface is still a matter of debate. In order to improve our knowledge of the geometry, the seismic cycle and the earthquake hazard of this subduction zone, we use marine terraces and microatolls as markers of tectonic motion over time scales ranging between 1 to 104 yrs. Based on very high resolution imagery from Pleiades satellites, we calculated 1m-resolution digital elevation models using the MicMac software on several island of the central Ryukyus. We performed a morphotectonic study of the islands, which allows for mapping up to nine marine terraces resulting from interactions between tectonic uplift and Quaternary sea-level changes. Series of topographic profiles permitted to estimate their altitude and the elevation of the paleoshorelines. Analyses of ages available in the literature, combined with the modeling of the growth of the reefs allow for estimating the timing and rates of the deformation. The pattern of the deformations shows that they are probably related to large regional motion at the plate interface. In all islands we visited in the central and south Ryukyus, we were able to identify, measure and map numerous microatolls. Microatolls are the only geological marker able to record tectonic movements with a precision of few centimeters and over time scales ranging between one and several thousands of years. This opens new opportunities to reconstruct the timing, extend, and magnitude of past coseismic and interseismic deformation over several seismic cycles of the Ryukyu megathrust.

**Mots-Clés:** Tellus, subduction, cycles sismiques, marine terraces, microatolls

<sup>\*</sup>Intervenant

## Distribution spatio-temporelle des gisements à préservation exceptionnelle dans l'Ordovicien inférieur de la région de Zagora (Maroc)

Bertrand Lefebvre <sup>\*1</sup>, Bernard Pittet <sup>1</sup>, Farid Saleh <sup>1</sup>, Pierre Sansjofre <sup>2</sup>, Muriel Vidal <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Géologie de Lyon - Terre, Planètes, Environnement [Lyon] (LGL-TPE) – Université Claude Bernard Lyon 1 : UMR5276 – France

<sup>2</sup> Laboratoire Géosciences Océan (LGO) – Université de Brest : UMR6538 – France

Découvert au début des années 2000, dans l'Ordovicien inférieur de l'Anti-Atlas central (Maroc), le Lagerstätte des Fezouata est le seul gisement actuellement connu dans tout l'Ordovicien à présenter des conditions de préservation comparables à celles des Konservat-Lagerstätten du Cambrien inférieur (p. ex. Chengjiang) à moyen (p. ex. Burgess Shale). Dans la région de Zagora, la Formation des Fezouata est une unité silto-gréseuse particulièrement puissante (~1000 m) qui a livré des assemblages marins extrêmement riches et diversifiés. Ceux-ci offrent la particularité d'être composés d'organismes caractéristiques des faunes post-cambriennes (p. ex. crinoïdes, euryptérides, graptolites) associés à des formes 'molles' ou peu minéralisées, qui n'étaient connues jusqu'alors qu'au Cambrien (p. ex. anomalocaridides, marrellomorphes, naraooïdes). Le Lagerstätte des Fezouata apporte par conséquent des informations cruciales sur un moment-clé de la diversification initiale des métazoaires, à la charnière entre Explosion Cambrienne et Grande Biodiversification Ordovicienne. Au cours des six dernières années, plusieurs missions de terrain réalisées dans l'Ordovicien inférieur de l'Anti-Atlas central ont permis de mettre en évidence une progradation générale des dépôts vers le NNW et de préciser le contexte biostratigraphique et paléoenvironnemental du Lagerstätte des Fezouata. Ainsi, dans la plaine des Ternata (au N de Zagora), la préservation exceptionnelle est restreinte à deux intervalles (dans la Zone à A. murrayi, Trémadocien supérieur et dans la Zone à ?B. jacksoni, Floien moyen), ainsi qu'à des conditions paléoenvironnementales bien définies (à la limite d'action des vagues de tempête). En 2017, ce modèle de distribution spatio-temporelle des niveaux à préservation exceptionnelle a été testé puis validé dans le cadre d'un projet INSU-SYSTER. En effet, de nouveaux sites à préservation exceptionnelle légèrement plus anciens (Trémadocien supérieur) ont été découverts à une vingtaine de km plus au Sud. Inversement, de nouveaux gisements plus récents (Floien supérieur) ont été mis en évidence environ 70 km plus au Nord. Ces résultats préliminaires confirment la relation étroite entre préservation exceptionnelle et conditions paléoenvironnementales. Ils soulignent également l'importance de l'identification des contraintes sédimentaires, car celles-ci peuvent ensuite être utilisées de manière prédictive pour découvrir de nouveaux gisements paléontologiques.

**Mots-Clés:** Lagerstätte, Maroc, Ordovicien, modèle de dépôt, Fezouata

<sup>\*</sup>Intervenant

## Ophiolites néoprotérozoïques: une fenêtre sur le plancher océanique ancien

Mélina Macouin <sup>\*ψ1</sup>, Florent Hodel <sup>1</sup>, Ricardo Trindade <sup>2</sup>, Antoine Triantafyllou <sup>3</sup>, Julien Berger <sup>1</sup>, Julie Carlut <sup>4</sup>, Jérôme Ganne <sup>1</sup>, Valérie Chavagnac <sup>1</sup>, Mathieu Rospabé <sup>1</sup>, Pierre Agrinier <sup>4</sup>, Nasser Ennih <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Géosciences Environnement Toulouse (GET) - Observatoire Midi-Pyrénées, IRD : UMR239, Université Paul Sabatier [UPS] - Toulouse III, CNRS : UMR5563, France

<sup>2</sup> Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciencias Atmosféricas [Sao Paulo] (IAG) - Brésil

<sup>3</sup> Université de Mons (UMons) - 20, place du Parc, B7000 Mons, Belgique

<sup>4</sup> Institut de Physique du Globe de Paris, Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, 1 rue Jussieu, F-75238 Paris Cedex 05 (IPGP) - UMR 7154 - France

<sup>5</sup> Université Chouaib Doukkali - El Jadida, Maroc

Les ophiolites néoprotérozoïques sont les témoins des subductions et de la lithosphère océanique associées à la dislocation du supercontinent Rodinia. L'étude de ces ophiolites permet de proposer des contextes de formation pour ces sections de lithosphère océanique mais aussi de préciser les paléoenvironnements prévalents à ces périodes. Nous avons focalisés notre étude sur deux massifs de serpentinites et les roches mafiques associées des unités ophiolitiques de l'Araguaia Belt ( $757 \pm 49$  Ma, Brésil) et de celles d'Aït Ahmane (Anti-Atlas, Maroc). Les affleurements de l'Araguaia Belt consistent principalement en des harzburgites intégralement serpentinisées recoupées localement par des filons de gabbros à olivine, de diabases et de pyroxénites. On y observe également quelques lentilles de dunites et de chromites. Ces lithologies ultramafiques sont localement en contact tectonique avec des laves en coussin. La signature géochimique des roches mafiques et ultramafiques atteste de l'affinité océanique de ces serpentinites, confirmée par les signatures N-MORB et E-MORB des basaltes associés, écartant tout lien avec une zone de supra-subduction. Nous proposons que ces unités ophiolitiques constituent les reliques d'une transition océan-continent en bordure du craton amazonien. Les donnés géochimiques sur les métaharzburgites et les métadunités de l'ophiolite d'Aït Ahmane, quant à elles, témoignent du lien de ces dernières avec un centre d'accrétion arrière-arc intra-océanique, à la marge du supercontinent Rodinia. Enfin, l'association des méthodes magnétiques, pétrographiques et géochimiques nous permet de proposer un modèle concernant la formation des veines de magnétite massives de l'unité d'Aït Ahmane Nord. Nous montrons que le triptyque : serpentinites, spinelles altérés et veines de magnétite centimétriques, constitue un système hydrothermal abyssal fossile, de type fumeur noir. Dans ce contexte, les compositions isotopiques en oxygène des veines de magnétite nous permettent de proposer une valeur du  $\delta^{18}\text{O}$  des océans néoprotérozoïques profonds de  $-1.33 \pm 0.98\text{ ‰}$  (VSMOW), soit une valeur très similaire à l'actuel (entre  $-1$  et  $+1\text{ ‰}$  VSMOW). Elle tranche aussi le débat sur l'évolution du  $\delta^{18}\text{O}$  des océans au cours des temps géologiques en attestant d'une constance de celui-ci, au moins depuis le Néoprotérozoïque.

**Mots-Clés:** magnétisme, paléoenvironnement, précambrien, oxygène, rodinia

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: melina.macouin@get.omp.eu

## Transformations de phase à l'interface noyau-manteau

Sébastien Merkel <sup>\*1,2</sup>, Christopher Langrand <sup>2</sup>, Nadège Hilairet <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut Universitaire de France (IUF) – Ministère chargé de l’enseignement supérieur et de la recherche – Boulevard Saint-Michel 75005 Paris, France

<sup>2</sup> Unité Matériaux et Transformations (UMET) – Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8207, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Lille (ENSCL), Institut national de la recherche agronomique (INRA) – Université de Lille 59000 Lille, France

La couche D'' se situe à la base du manteau inférieur terrestre, à 2700 km de profondeur. Cette région de 200 km d'épaisseur est importante pour comprendre la terre et son évolution car elle constitue un interface majeure dans la structure interne de la planète. Tout comme la croûte, elle constitue une "couche limite" dans la dynamique globale du manteau avec des sauts de propriétés physiques et de température beaucoup plus importants que dans le reste de la planète. Les mesures sismiques indiquent, de plus, que ses propriétés sont très hétérogènes et très différentes de celle du manteau inférieur.

Dans nos travaux, nous cherchons à étudier expérimentalement les transformations minérales se produisant à ces profondeurs. En particulier, nous regardons la transformation du minéral bridgemanite, de structure perovskite, vers une structure post-perovskite à ces conditions. Nous cherchons à comprendre comment cette transformation affecte la microstructure à ces profondeurs. La transformation entraîne-t-elle une modification de taille de grains? Est-elle associée à une perte de mémoire de microstructure ou la microstructure garde-t-elle la trace des processus subis dans le manteau inférieur? Peut-on lier ces microstructures à des observations et à la dynamique de ces régions?

Je présenterai ici les principes, méthodologies, et objectifs de nos travaux et comment des expériences de minéralogie sous haute pression et haute température, couplées à des observables sismiques permettent d'aborder l'histoire et les propriétés de ces régions.

Ces projets ont fait l'objet d'un soutien du programme PNP du CNRS sans lequel ils n'auraient pas abouti.

**Mots-Clés:** Minéraux, pression, manteau, terre profonde, expériences

<sup>\*</sup>Intervenant

## Apatite: A powerful proxy to study ore deposits?

Marc Poujol <sup>\*ψ1</sup>, Yannick Branquet <sup>ψφ1,2</sup>, Jean-Marc Baele <sup>§3</sup>, Romain Tartese <sup>4</sup>, I. Kere

1 Géosciences Rennes (GR) – Université de Rennes 1, Centre National de la Recherche Scientifique – France

2 Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO) – Université d'Orléans, CNRS : UMR7327, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Campus Géosciences 1A, rue de la Férollerie 45071 Orléans cedex 2, France

3 Université de Mons (UMons) – 20, place du Parc, B7000 Mons, Belgique

4 University of Manchester – Royaume-Uni

Apatite ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$ ) is an ubiquitous accessory mineral found in many types of rocks and environments. This mineral has several key features for the characterization and/or the dating of fluid circulation or magmatism responsible for the emplacement of mineralization: Apatite often incorporates uranium during its crystallization. This makes it an excellent candidate for U-Pb dating. Moreover, apatite can also be dated by the fission tracks and (U-Th)/He methods. Therefore, the same mineral can bring information on the age of the mineralization and its exhumation history. In addition, this mineral is an excellent trap for the P, F, Cl, OH, but also for Rare Earth Elements (REE) and it can easily react in the presence of brines, or aqueous fluids containing  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  and/or F.

In many ore deposit, the crystallization of apatite is contemporaneous with mineralization processes and its closure temperature with respect to the U-Pb system (375-550 °C) gives it a peculiar role for dating hydrothermal events.

Accordingly, apatite is, *a priori*, an excellent proxy for obtaining extensive information about mineralizing fluids and/or fertile magmas (temperatures, compositions and ages or durations of the events), information that is essential for establishing a metallogenic model.

We will present a comprehensive set of CL imaging, EPMA analyses, SIMS stable isotopes and LA-ICP-MS U-Pb dating on apatite from several ore deposits in order to assess the potential of this mineral for the study of ore deposits.

**Mots-Clés:** Tellus, apatite, ore deposits

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: marc.poujol@univ-rennes1.fr

<sup>φ</sup>Auteur correspondant: yannick.branquet@univ-orleans.fr

<sup>§</sup>Auteur correspondant: jean-marc.baele@umons.ac.be

## Advances in 3D imaging and volumetric reconstruction of fluid and melt inclusions by high resolution X-ray computed tomography

Antonin Richard <sup>\*<sup>1</sup></sup>, Christophe Morlot <sup>1</sup>, Laura Crémont <sup>2</sup>, Nicolas Beaudoin <sup>3</sup>, Vanessa Dyja-Person <sup>1</sup>, Gaston Giuliani <sup>1</sup>, Isabella Pignatelli <sup>1</sup>, Hélène Legros <sup>1</sup>, Jérôme Sterpenich <sup>1</sup>, Jacques Pironon <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources lab., Boulevard des Aiguillettes B.P. 70239, F-54506, Vandoeuvre-lès-Nancy, France – Université de Lorraine – France

<sup>2</sup> Géosciences Le Mans, Le Mans Université, UFR Sciences et techniques, avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans Cedex 9, France – Le Mans Université – France

<sup>3</sup> Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs-IPRA, E2S-UPPA, Total, CNRS, Université de Pau et des Pays de l'Adour, UMR5150, Pau, France – Université de Pau et des Pays de l'Adour – France

Fluid and melt inclusions are tiny pockets of fluid and melt trapped in natural and synthetic minerals. Characterizing the 3D distribution of fluid and melt inclusions within minerals, their shape and the volume fraction of their different phases is crucial for determining the conditions of crystal growth and paleostress analysis. However, their relatively small size (typically 5 to 100  $\mu\text{m}$ ), complex shape, heterogeneous content, the opaque nature of some host minerals and projection bias frequently hamper accurate imaging and volumetric reconstruction using conventional microscopic techniques. High resolution X-ray computed tomography (HRXCT) is a non-destructive method which uses contrasts of X-ray attenuation in a series of contiguous radiographs with different view angles to reconstruct the 3D distribution of areas of different densities within a large variety of materials. In this work, we show the capabilities HRXCT for: (i) imaging the 3D distribution of aqueous and hydrocarbon-bearing fluid inclusions and silicate melt inclusions in a crystal; (ii) characterizing the shape of fluid and melt inclusions and (iii) reconstructing the total volume and the volume of the different phases (liquid, glass, crystal, vapor) of fluid inclusions and melt inclusions. We have used a variety of hand specimens and chips of transparent and opaque minerals (olivine, quartz, feldspar, garnet, emerald, wolframite), that we analyzed using three different HRXCT setups. When a resolution of  $\sim 1 \mu\text{m}^3/\text{voxel}$  is achieved, HRXCT allows identifying  $> 5 \mu\text{m}$  fluid inclusions, and the identification and volumetric reconstruction of the different phases can be carried out with reasonable confidence for relatively large ( $> 25 \mu\text{m}$ ) inclusions. Density contrasts are high enough to properly identify: (i) a silicate melt inclusion, and its different phases (glass, vapor and crystals such as clinopyroxene and spinel) in an olivine crystal; (ii) aqueous monophase (liquid) and two-phase (liquid + vapor) fluid inclusions in transparent and opaque minerals (quartz, garnet, emerald, wolframite). In the case of hydrocarbon-bearing fluid inclusions containing a vapor phase and two liquid phases (oil and aqueous solution), the two liquid phases could not be distinguished from each other. Collectively, our results show that HRXCT is a promising tool for non-destructive characterization of fluid and melt inclusions.

**Mots-Clés:** Inclusion fluide, Tomographie, Rayons X, Imagerie 3D

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>✉</sup>Auteur correspondant: antonin.richard@univ-lorraine.fr

## Propagation of magma associated to Piton de la Fournaise eruptions from joint inversion of InSAR and GNSS data

Delphine Smittarello <sup>1</sup>, Valerie Cayol <sup>\*ψ2</sup>, Virginie Pinel <sup>1</sup>, Aline Peltier <sup>3</sup>, Jean-Luc Froger <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) – Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR219, Université Savoie Mont Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5275 – France

<sup>2</sup> Laboratoire Magmas et Volcans – Université de Lyon | UJM St-Etienne, CNRS : UMR6524, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR163, Université Clermont Auvergne – France

<sup>3</sup> Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise (OVPF) – IPGP, 14 RN3-Km27, 97418, La Plaine des Cafres, La Réunion, France, La Réunion

<sup>4</sup> Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) – Université Clermont Auvergne, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR6524, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UMR163 – France

Magma stored beneath basaltic volcanoes is often transported by propagation of planar intrusions, which lead to fissural eruptions when they intersect the Earth's surface. This propagation is an unsteady and complex process controlled by the magma-crust interaction. For instance, at Piton de la Fournaise volcano (La Réunion, France), intrusions have different velocities depending on the distance of the eruptive fissures from the summit, some intrusions fail to result in eruptions, eruptive fissures can be located at the summit, on the cone flanks or can be distal. To gain information into the dynamics of magma propagation at Piton de la Fournaise volcano, complementary ground deformation datasets which cover the May 2016 eruption are inverted. SAR interferograms providing a high spatial resolution and continuous GNSS data providing a high temporal resolution are jointly used in a procedure that combines 3-D boundary element models with a Monte Carlo inversion. We first retrieve the final geometry of the intrusion based on four interferograms, both in ascending and descending tracks, spanning the whole propagation phase. The imaged intrusion consists in a 2700 m long sill located at an elevation of 800 m, connected to the eruptive fissure by a 880 m sub-vertical dike. Using continuous GNSS data and a Sentinel-1 InSAR interferogram acquired during the propagation phase, we show the a-priori brought by InSAR is required to constrain the intrusion depth. Temporal inversions with a 5 min time step evidence that the horizontal part of the intrusion is already open a few tens of minutes after the beginning of the crisis. The intrusion then stalls for 4 hours, with no volume increase, until the last part of the intrusion propagates vertically in a fracture narrower than the sill. The unsteady propagation and the final change of direction indicate the presence of structural barriers to propagation, while the lack of volume change and the narrow vertical fracture indicate the leading role of magmatic gas in the final part of the intrusion.

**Mots-Clés:** intrusions, basaltic shield volcano, Piton de la Fournaise, InSAR, GNSS

<sup>\*</sup>Intervenant

<sup>ψ</sup>Auteur correspondant: v.cayol@opgc.fr

## Interaction surface/intérieur dans les mondes glacés du Système solaire : l'exemple d'Encelade

Gabriel Tobie \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Planétologie et Géodynamique (LPG) – CNRS : UMR6112, INSU, Université de Nantes – France

L'exploration des mondes glacés par différentes missions spatiales (Galileo (1996-2003) autour de Jupiter, Cassini-Huygens (2004-2017) autour de Saturne, New Horizons (2015) lors du survol du système Pluton-Charon) a révélé que plusieurs corps possèdent des océans d'eau liquide sous leur croûte glacée, notamment Europe, Ganymède, Titan, Encelade et Pluton. La découverte de ces océans ouvre de nouvelles perspectives tant pour la compréhension de l'évolution de ces mondes glacés que pour l'évaluation de leur potentiel exobiologique.

L'évolution de cette hydrosphère (océan + glace) a aussi vraisemblablement joué un rôle majeur sur l'activité géologique que l'on observe à la surface de ces objets, ainsi que sur les processus d'échanges entre l'intérieur profond et la surface, en particulier sur Encelade et Europe, où des éruptions de vapeur ont été découvertes. Le présent projet a pour objectif de mieux comprendre le couplage entre l'activité de surface et l'évolution de l'intérieur de ces satellites de glace en support à l'exploitation des données par les missions spatiales (Cassini-Huygens et New Horizons) et à la préparation des futures missions (Europa Clipper, JUICE).

Ces dernières années, nos travaux se sont concentrés sur la lune Encelade qui apporte une opportunité unique d'étudier des processus de couplage entre la dynamique interne et l'activité de surface. À partir de l'analyse des données collectées par la sonde Cassini, nous avons pu proposer des modèles 3D de la structure de la couche de glace et de la dynamique interne permettant d'expliquer les activités observées en surface et leur concentration au niveau de son pôle sud. Nous avons ainsi montré que les effets de marée jouent un rôle majeur tant sur la dynamique profonde que sur l'activité tectonique et éruptive observée à sa surface. Les développements méthodologiques effectués dans le cas d'Encelade pourront par la suite être appliqués à d'autres objets, en particulier Europe pour la préparation des futures missions Europa Clipper et JUICE.

**Mots-Clés:** Satellites de glace, Intérieur, Dynamique Interne, Evolution

\*Intervenant

## Stratégies de thermorégulation chez les ichthyosaures du Jurassique Inférieur

Peggy Vincent <sup>\*1</sup>, Guillaume Suan <sup>2</sup>, Erin Maxwell <sup>3</sup>, Christophe Lecuyer <sup>2</sup>, Rainer Schoch <sup>3</sup>,  
François Fourel <sup>4</sup>, Romain Amiot <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne Université (CNRS-MNHN-UPMC) – Museum National d’Histoire Naturelle, Département Origines et Evolution, UMR CNRS-MNHN-UPMC 7207, Centre de Recherche sur la Paléodiversité et les Paléoenvironnements (CR2P) – 57, rue Cuvier - 75231 Paris Cedex 05, France

<sup>2</sup> Université Claude Bernard Lyon 1 (LGTPE) – CNRS : UMR5276 – France

<sup>3</sup> Staatliches Museum für Naturkunde, Stuttgart, Germany (SMNS) – Allemagne

<sup>4</sup> Laboratoire d’Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés (LEHNA) – Université Claude Bernard Lyon 1 : UMR5023 – France

Les reptiles marins mésozoïques ont connu un succès évolutif incontestable de par leur diversité morphologique, leur longévité et leur répartition géographique. Des études histologiques et géochimiques ont récemment montré que certains reptiles marins mésozoïques, bien que longtemps considérés comme des animaux à "sang-froid" (ectothermes), étaient en mesure de maintenir leur température corporelle à des valeurs élevées. En effet, la comparaison entre la composition en isotopes stables de l'oxygène ( $\delta^{18}\text{O}$ ) dans l'apatite biogène des dents de reptiles marins et celle des poissons des mêmes gisements indiquent une thermorégulation active chez plusieurs taxons appartenant à trois grands groupes mésozoïques, les Sauropterygia, les Ichthyosauria et les squamates Mosasauridae. Il s'agissait donc d'organismes en grande partie thermo-indépendants du milieu. Néanmoins, les stratégies de thermorégulation qu'ils utilisaient pour maintenir des températures élevées dans les environnements marins très exigeants restent mal comprises. De nombreux animaux endothermes marins actuels (e.g., pingouins, phoques, dauphins) utilisent l'hétérothermie régionale comme stratégie de thermorégulation pour contrôler les pertes de chaleur, alors que d'autres sont homéothermes et ont des températures peu variables à travers tout le corps. Ces différentes stratégies de thermorégulation doivent en théorie se traduire par des signatures en  $\delta^{18}\text{O}$  distinctes au sein des restes dentaires et osseux, c'est-à-dire par une variabilité en  $\delta^{18}\text{O}$  plus forte pour les animaux utilisant l'hétérothermie régionale et faible à nulle chez un homéotherme. Nous avons testé ces hypothèses grâce à des mesures du  $\delta^{18}\text{O}$  de l'apatite de différentes parties de plusieurs squelettes (vertèbres, os long, phalanges) sub-complets d'ichtyosaures du genre *Stenopterygius* du Toarcien inférieur (Jurassique inférieur) du SW de l'Allemagne. Les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  obtenues sont systématiquement plus hautes dans les parties les plus externes du squelette (phalanges, vertèbres postérieures), et suggèrent des températures de minéralisation plus basses d'environ 4°C par rapport aux éléments les plus internes (vertèbres antérieures, ceintures). Ces résultats indiquent que les ichthyosaures utilisaient l'hétérothermie régionale pour limiter les pertes de chaleur corporelle tout en maintenant une température élevée pour assurer un bon rendement métabolique.

**Mots-Clés:** Ichtyosaures, géochimie, thermophysiologie

<sup>\*</sup>Intervenant

## 15.4 Projets Agence Nationale de la Recherche

L'Agence Nationale de la Recherche (ANR) a pour mission la mise en œuvre du financement de la recherche sur projets en France sur un mode de sélection compétitive. Chaque année, elle lance un appel à projets générique (AAPG) ouvert à toutes les disciplines scientifiques et à tous types de recherche, depuis les projets les plus fondamentaux jusqu'aux recherches appliquées. Il est ici proposé de présenter la place des géosciences dans l'AAPG. Conçue en forum de discussion, cette session s'appuiera sur les témoignages de quelques coordinateurs de projets en cours ou achevés et sur le retour d'expérience d'anciens membres du comité d'évaluation.

Elle sera séquencée de la manière suivante :

- **Rappel des grands principes de l'AAPG (ANR)**

Frédéric MONOT, Anne LIEUTAUD, Céline BILLIERE, Agence Nationale de la Recherche (ANR)

- **Retours d'expériences de Comités d'Evaluation Scientifique**

Emanuela MATTIOLI, Université Claude Bernard Lyon 1, Laboratoire de Géologie de Lyon : Terre, Planètes et Environnement, Patric JACOBS, Ghent University

- **Présentations de projets géosciences financés par l'ANR par les coordinateurs de projets**

**AFTER**, Après la fin : la reconstruction des communautés marines durant la rediversification du Trias inférieur

Arnaud BRAYARD, Université de Bourgogne, Biogéosciences, Projet jeune chercheur 2013

**SeqStrat-Ice**, Les glaciations du passé: leçons pour un modèle de stratigraphie séquentielle dédié aux systèmes glaciaires

Jean-François GHIENNE, Institut de Physique du Globe de Strasbourg, Projet collaboratif 2012

**Anox-Sea**, Rôle de la configuration des continents dans le développement d'anoxies globales dans l'océan profond

Emmanuelle PUCEAT, Université de Bourgogne, Biogéosciences, Projet collaboratif 2012

**HAMOC**, Dynamique des gyres Nord Atlantique et overturning de la Méditerranée au cours des changements climatiques de l'Holocène

Christophe COLIN, GEOSCIENCES Paris Sud, Projet collaboratif 2013

**MOBISED**, Modélisation de la remobilisation des sédiments et libération des contaminants associés

Emmanuelle MONTARGÈS-PELLETIER, CNRS - Université de Lorraine, Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux, Projet collaboratif international 2014



26<sup>e</sup> édition | Réunion des Sciences de la Terre | 26th edition | Earth Sciences Meeting

## INDEX PAR AUTEURS

---

## 3

372 And 375 Expedition · 284

---

## A

- Abbache Abdelkader · 66  
 Abbasov Orhan · 93, 107  
 Abbes Chedly · 607  
 Abdelmadjid Meriem · 92  
 Abidi Oussama · 90  
 Abiven Baptiste · 470  
 Aboussou Anabel · 641  
 Abriak Nor-Edine · 39  
 Abtout abdeslam · 183  
 Acharki Siham · 374  
 Achoundong Gaston · 406  
 Adaci Mohammed · 6  
 Adatte Thierry · 61, 642  
 Addad Ahmed · 323  
 Ader Magali · 335, 402  
 Admou Hassan · 435  
 Adrados Luna · 609  
 Adrian Yves-Marie · 519  
 Adusei-Gyamfi Junias · 371  
 Afenzar Abdelkrim · 13  
 Afilhado Alexandra · 269  
 Afroz Munira · 329, 334  
 Agard Philippe · 25  
 Agogue Hélène · 402  
 Agranier Arnaud · 324  
 Agrinier Pierre · 716  
 Aguilar Carmen · 179, 429, 439  
 Aichholzer Coralie · 662  
 Airaghi Laura · 208, 430  
 Airo Alessandro · 326  
 Aizprua Luna Carlos Alberto · 273, 274, 287  
 Akhter Syed Humayun · 43, 594, 678  
 Al Matoni Hamza Salem Bobaker · 140  
 Al Reda Mustafa · 35, 48  
 Alam Md. Samrat · 335  
 Alary Claire · 39, 348  
 Alçıçek Mehmet Cihat · 116  
 Alessi Daniel S. · 335  
 Alindawa Déodat · 702  
 Allanic Cécile · 144, 147, 209, 386, 632  
 Allard Maël · 234  
 Allemand Pascal · 298  
 Allen Deonie · 364, 400  
 Alonso-Garcia Montserrat · 313  
 Althoff Fernando · 476  
 Amakrane Jemaa · 431  
 Amann Méderic · 250  
 Amédro Francis · 549  
 Ameur Chebila · 431  
 Amharref Mina · 374  
 Amiaud Bernard · 357  
 Amin Fouad · 477, 649, 651, 654  
 Amit Romain · 722  
 Amiri Adnen · 90, 176, 425  
 Amraoui Yassir · 617  
 Anceau Annick · 547, 551  
 Anczkiewicz Robert · 174, 443, 460  
 Andersen Thorbjørn Joest · 77  
 André-Mayer Anne-Sylvie · 444, 466  
 Andrieu Simon · 121  
 Andrieu-Ponel Valérie · 116  
 Angrand Paul · 184, 210, 211  
 Annesley Irvine · 325  
 Anquetil Christelle · 68  
 Anschutz Pierre · 350  
 Antoine Pierre-Olivier · 54  
 Antonio Paul · 426  
 Arabas Agnieszka · 319  
 Aradhna Tripati Aradhna · 324  
 Arafa Ahmed · 341  
 Archontikis Odysseas · 303  
 Ard Vincent · 490, 491  
 Aretz Markus · 711  
 Argant Jacqueline · 501  
 Armynot du Châtelet Eric · 67, 77, 151, 486, 487, 534  
 Arnaud Fabien · 508  
 Arnaud Nicolas · 189  
 Arnaud-Godet Florent · 304  
 Artigas Luis Felipe · 69  
 Asatryan Gayané · 310  
 Aslanian Daniel · 269, 602  
 Athanasiou Maria · 319  
 Atouabat Achraf · 206, 225  
 Atto Abdourrahmane · 345, 379  
 Aubert Coralie · 708  
 Aubert Irène · 122, 212  
 Aubineau Jérémie · 321  
 Aubourg Charles · 15, 139, 213, 226, 422  
 Audet Marc Antoine · 699  
 Audin Laurence · 605  
 Audo Denis · 292, 299  
 Auger Pascal · 461  
 Augier Romain · 152, 433, 458  
 Auguste Patrick · 296, 548  
 Aumar Cyril · 214  
 Austermann Jacqueline · 411  
 Authemayou Christine · 590  
 Autin Julia · 244, 246  
 Auzende Anne-Line · 479  
 Avagyan Ara · 310  
 Averbuch Olivier · 153, 156, 168, 169, 247, 253, 386, 617  
 Avila Janaina · 332  
 Ayalew Dereje · 257  
 Ayrault Sophie · 360, 368  
 Azar Dany · 64  
 Azema Emilien · 130  
 Azzimani Yassine · 663

## B

Baby Guillaume · 36, 45, 217, 230  
 Baby Patrice · 36, 54, 188  
 Bachelery Patrick · 32, 271  
 Bachellerie François · 528  
 Bader Anne-gaëlle · 210  
 Baele Jean-Marc · 27, 127, 158, 164, 533, 718  
 Baghli Hicham · 304  
 Bahain Jean-Jacques · 424  
 Baidder Lahssen · 176, 700  
 Baillet Laurent · 588  
 Bailleul Julien · 20, 47, 109, 119, 247, 276, 277, 282, 283  
 Baily Laurent · 463, 480, 687, 690, 701  
 Baily-Comte Vincent · 620  
 Bajard Manon · 508  
 Bajiolet Flora · 49  
 Ballas Gregory · 123  
 Ballesteros Daniel · 145, 519, 609  
 Baloglanov Elnur · 93, 107  
 Baltzer Agnès · 72, 131, 137, 138  
 Bankole Olabode · 16  
 Baptiste Julien · 37, 154, 155  
 Baral Céline · 215  
 Baratoux Lenka · 426  
 Barbarand Jocelyn · 35, 40, 48, 121, 198, 236, 432  
 Barbey Pierre · 163  
 Barbin Vincent · 87  
 Barnes Christophe · 672  
 Barou Fabrice · 165  
 Barras Julie · 534  
 Barré Guillaume · 190  
 Barré Pierre · 635, 636, 639, 640, 642, 643  
 Barriel Véronique · 295  
 Barrier Laurie · 203, 598  
 Bascle Sylvain · 60  
 Bascou Jérôme · 413  
 Batalev Vlad · 203  
 Bataleva Elena · 204  
 Batonneau Yann · 472  
 Bauda Pascale · 579  
 Baudin François · 61, 64, 409, 410, 412, 635, 636, 637, 639, 640, 642, 643, 644  
 Baudin Thierry · 177, 196, 230, 232, 264  
 Baudu Michel · 60  
 Bauer Hugues · 610  
 Baux Noémie · 418  
 Beauchamps Gildas · 664  
 Beude Laurence · 671  
 Beaudoin Alexandre · 152, 433  
 Beaudoin Nicolas · 719  
 Beaufort Daniel · 89, 136, 142, 472  
 Beaufort Luc · 271  
 Beaufumé Kevin · 251  
 Beauval Cédric · 528  
 Beccaletto Laurent · 9, 10, 153, 154, 155, 156, 409

Beck Christian · 285  
 Beck Lucile · 488  
 Becker Thorsten · 199  
 Belkebir Lahcene · 115  
 Belkhedim Lahcene · 114  
 Belkhedim Salim · 114, 115, 124  
 Bellahsen Nicolas · 42, 198, 208, 216, 242, 255, 257, 430, 473  
 Bellanger Mathieu · 181, 673  
 Bellier Olivier · 223  
 Benbaqqal Hicham · 128, 656  
 Benbih Myriam · 670  
 Benbouziane Abdelmajid · 113, 125  
 Bendali Mohamed · 183  
 Bendaoud Abderrahmane · 157, 158  
 Benedetti Lucilla · 590  
 Benhamou Miloud · 124  
 Benhamza Moussa · 584  
 Benizri Emile · 357  
 Benjelloun Yacine · 489, 588  
 Benlaoukli Bachir · 647, 648  
 Benmammar Anissa · 157, 158  
 Benoit Pierre · 589  
 Bensalah Mustapha · 6, 304  
 Benyassine El Mehdi · 375  
 Benyoucef Madani · 6  
 Berger Jean-François · 501, 514  
 Berger Julien · 157, 158, 163, 181, 194, 716  
 Bergerat Françoise · 148, 549, 555, 556, 563  
 Bernard Cecile · 402  
 Bernard Cyrielle · 434  
 Bernard Julien · 610, 623, 628, 629, 709  
 Bernard Paul · 244, 246  
 Bernard Sylvain · 134, 299, 323, 327, 484  
 Berné Serge · 29  
 Bernet Matthias · 42, 216, 242, 413  
 Bernoussi A. Samed · 374  
 Bertin Xavier · 73  
 Bertrand Aunay · 623  
 Bès De Berc Séverine · 623  
 Bessin Paul · 36, 705  
 Beucler Eric · 554  
 Beyssac Olivier · 127  
 Beziat Didier · 434, 463, 480, 687, 701, 702, 703  
 Bhilisse mohamed · 435  
 Bhiry Najat · 527  
 Bhurtun Pratima · 361, 372  
 Bialkowski Anne · 610, 709  
 Biari Youssef · 111, 112  
 Bichaud Victoria · 93, 107  
 Biguenet Maude · 401  
 Billet David · 354  
 Billon Gabriel · 67, 77, 348, 361, 371, 372  
 Binder Didier · 505  
 Binet Stephane · 364, 400  
 Biscara Laurie · 32, 271  
 Biteau Jean-Jacques · 94  
 Bitri Adnand · 619  
 Blanpain olivier · 71

- Blanpied Christian · 110  
 Blawal Syed · 116  
 Blieck Alain · 290  
 Blockmans Sabine · 38  
 Blouet Jean Philippe · 95  
 Blouet Jean-Philippe · 105, 106  
 Blouin Arthur · 93  
 Bodinier Jean-Louis · 11  
 Boiron Marie-Christine · 438, 440, 698  
 Boiron Tiphaine · 213  
 Boisramé Guillaume · 401  
 Boissarie Jean-Renaud · 8  
 Boisson Marc · 582  
 Boisvert Baptiste · 331  
 Boivin Clément · 253  
 Bolle Olivier · 162  
 Bolou-Bi Bolou Emile · 351  
 Bonifacie Magali · 126  
 Bonin Bernard · 616  
 Bonneau Adelphine · 529  
 Bonnel Cédric · 15, 108, 213, 226  
 Bonnet julien · 478, 483  
 Bonnière Antoine · 247, 253  
 Bonno Mickael · 189, 673  
 Bonte Damien · 665  
 Bonte Phlippe · 360  
 Bopp Laurent · 405  
 Borderie Sandra · 185, 186, 187, 188  
 Bordes Jean-Guillaume · 528  
 Bordier Louise · 368  
 Borgomano Jean · 31, 52, 99, 100, 101, 117, 300, 570  
 Borrero Luis · 615  
 Bosc Christelle · 376  
 Bosc Rémi · 466  
 Boscardin Rachel · 363  
 Bosch Delphine · 227, 454  
 Boschian Giovanni · 505  
 Bosse Valérie · 166, 214, 225, 451, 467  
 Bouabdellah Mohammed · 450  
 Bouabsa Lakhdar · 404  
 Bouat Loïc · 436  
 Bouchet Vincent · 67, 77  
 Bouchot Vincent · 666  
 Boudagher-Fadel Marcelle · 31  
 Bouffier Christian · 613  
 Bougeault Cédric · 410  
 Bouilhol Pierre · 199  
 Boujamaoui Mustapha · 176, 425, 603, 700  
 Boukari Claire · 432  
 Boukerbout Hassina · 183  
 Boulanger Philippe · 550  
 Bouligand Claire · 713  
 Boulobassi Ioanna · 319  
 Boulvais Philippe · 165, 220, 408, 437, 438, 453, 465, 469  
 Bouquerel Hélène · 322  
 Bourbon Pierre · 581  
 Bourbon Xavier · 478, 483  
 Bourdelle Franck · 478, 483, 664  
 Bourdillon Chantal · 27, 385  
 Bourget Julien · 271  
 Bourgine Bernard · 610  
 Bourgon Desroches Myosotis · 527  
 Bourillet Jean-François · 389  
 Bourillot Raphaël · 89, 142, 581  
 Bourlange Sylvain · 278, 284  
 Bourmatte Amar · 419  
 Bourquin sylvie · 9, 10, 203, 409, 672  
 Bourven Isabelle · 60  
 Bousquet Romain · 84  
 Boussafir Mohammed · 62, 63  
 Boussarsar Marwa · 607  
 Boutouil Mohamed · 659  
 Boutoux Alexandre · 216  
 Bout-Roumazeilles Viviane · 61  
 Bouwafoud Amine · 113, 125  
 Bouyahiaoui Boualem · 183  
 Bouzenoune Azzedine · 104, 697  
 Bowden Stephen · 262  
 Braga Juan · 31  
 Brahimi djamel · 340  
 Branchu Philippe · 368  
 Branquet Yannick · 165, 220, 437, 438, 453, 465, 469, 718  
 Brasselet Sébastien · 418  
 Braucher Régis · 195  
 Braun Jean · 41, 56  
 Brayard Arnaud · 337  
 Breillat Noémie · 27  
 Brenner Konstantin · 671  
 Brenon Emeric · 554  
 Brénot Jérôme · 553  
 Bretagne Eloïse · 467  
 Bretaudeau François · 619  
 Briais Justine · 35, 36, 48, 50, 217, 230, 386, 387  
 Brichau Stéphanie · 456  
 Brigaud benjamin · 7, 89, 121, 126, 142, 432  
 Brochier Jacques · 529  
 Broucke Olivier · 84  
 Broussolle Arnaud · 439  
 Bruel Dominique · 667  
 Brugeron Alexandre · 610  
 Bruguier Olivier · 22, 158, 227, 454, 464, 673  
 Brun Jean Jacques · 636  
 Brunet Morgane · 284  
 Bruniaux Guillaume · 490, 491  
 Bruno Caline · 147  
 Brusset Stephane · 36  
 Bruxelles Laurent · 611  
 Buck Roger · 678  
 Buisson Marc · 218  
 Bull Jon · 258  
 Bulois Cédric · 268  
 Bulteau Théo · 612  
 Buret Christophe · 275, 276  
 Burgevin Alexandre · 526  
 Busigny Vincent · 332  
 Busson Jean · 99  
 Bylund kevin · 337  
 Byrdina Svetlana · 713

## C

Cabidoche Marina · 14  
 Cadeau Pierre · 402, 412  
 Cadet Mélissa · 492  
 Caffe Pablo J. · 449  
 Cagatay Namik M · 78, 103  
 Cagnard Florence · 160, 180, 196, 469  
 Cahyarini Sri Yudawati · 590  
 Caillaud Alexis · 61  
 Caillaud Jacinthe · 189, 348  
 Calassou Sylvain · 190, 218, 222, 232  
 Calcagno Philippe · 666  
 Calderon Ysabel · 188, 679  
 Callot Jean-Paul · 191, 213, 235, 422, 592  
 Calmels Damien · 126  
 Calves Gerome · 55  
 Campos Eduardo · 456  
 Camps Pierre · 422  
 Camus Adrien · 490  
 Camus Hubert · 215, 620  
 Cancès Benjamin · 579  
 Caner-Chabran Anne · 354  
 Canva Albane · 219  
 Capel Elliott · 291  
 Capiaux Herve · 356  
 Cappetta Enri · 6  
 Caquineau Tom · 332  
 Carcaillet Julien · 588  
 Caridroit Martial · 305, 316  
 Cariou Elsa · 72  
 Cariou Valérie · 82  
 Carigt Séverine · 619, 666, 671  
 Carlut Julie · 322, 489, 493, 716  
 Carocci Eleonora · 440, 698  
 Caron Vincent · 119, 275, 276  
 Carpenter Cedric · 625  
 Carretier Sébastien · 456  
 Carruthers Daniel · 105, 106  
 Cartier Adrien · 88  
 Cartigny Pierre · 332, 337  
 Cascales-Miñana Borja · 291  
 Castilla Raymi · 269  
 Cathelineau Michel · 438, 440, 698  
 Cattaneo Antonio · 285  
 Cauche Dominique · 517  
 Caumon Marie-Camille · 482  
 Cavelan Amélie · 62, 63  
 Cayla Lucile · 247  
 Cayol Valerie · 720  
 Cazes Quitterie · 496, 497, 658  
 Cécillon Lauric · 635, 636, 639, 640, 642, 643  
 Célini Naïm · 191  
 Cercy Christine · 502  
 Cerepi Adrian · 132, 133, 583  
 Cetin F. · 406

Cez LUCIE · 494  
 Chabani Arezki · 667  
 Chabaud Ludivine · 98, 100, 317  
 Chaboureau Anne-Claire · 55, 405  
 Chadourne-Facon Lucie · 376  
 Chaduteau Carine · 402  
 Chaftar Hedi-Ridha · 58  
 Chagué Catherine · 369  
 Chaïma somrani · 307  
 Chalmin Emilie · 495  
 Chalouan Ahmed · 166, 451  
 Chamot-Rooke Nicolas · 249  
 Champilou Jean-Baptiste · 137, 138  
 Chang Nigel · 492  
 Chang Shan · 309  
 Chang Sung-Ping · 249  
 Chanier Frank · 109, 119, 247, 252, 253, 265, 275, 276,  
     277, 279, 282, 283, 386, 600  
 Chantel Julien · 565, 568  
 Chanteraud Claire · 495  
 Chanvry Emmanuelle · 21, 118  
 Chao Lyu · 708  
 Chapelet Madeline · 331  
 Chaplain Nicolas · 71  
 Chapon patrick · 477  
 Chappaz Anthony · 61  
 Charbonnier Céline · 350  
 Charbonnier Sylvain · 134, 292, 295, 299  
 Chardon Dominique · 49, 159  
 Chargé Estelle · 496, 497, 658  
 Charles Nicolas · 557  
 Charlier Gilles · 649, 651  
 Charmoille Arnaud · 683  
 Charpentier Mickael · 96  
 Charreau Julien · 46, 596  
 Charrière André · 6  
 Chateauneuf Jean-Jacques · 386  
 Chaumillon Eric · 73, 369  
 Chaussé Christine · 498  
 Chauveau Denovan · 590  
 Chauvet François · 218, 248  
 Chauvin Christian · 350  
 Chavagnac Valérie · 716  
 Chazot Gilles · 489  
 Chebli Ryma · 442  
 Chellaï El Hassane · 11, 12  
 Chelle-Michou Cyril · 181  
 Chen Chen · 270  
 Chen Yan · 154  
 Chène Frédéric · 610  
 Chenu Claire · 635, 642, 643  
 Cheppe Gaetan · 691  
 Chesne Antoine · 97  
 Cheval-Garabédian Florent · 441  
 Chevallier Thiphaine · 642  
 Chevrot Sébastien · 190, 232, 240  
 Chima Kelvin Ikenna · 18  
 Chlieh Mohamed · 605  
 Chomet Théophile · 585

Chopin Christian · 170  
 Chopin Francis · 173, 192, 429, 442  
 Choquel Constance · 308  
 Chou Yu-Min · 517  
 Choulet Flavien · 152, 472  
 Christopher Wibberley · 97  
 Cifci Gunay · 103  
 Ciner Attila · 615  
 Cisneros Andrea · 605  
 Clausen Sébastien · 309  
 Clausse Antoine · 250  
 Claussmann Barbara · 277  
 Claustres Adrien · 364  
 Cleal Chris J. · 291  
 Clerc Camille · 255  
 Cloquet Christophe · 358  
 Cobert Corentin · 127  
 Coccia stella · 613  
 Cochelin Bryan · 159, 160, 161, 177  
 Cogné Alexie · 414  
 Cogné Nathan · 47, 467  
 Cojan Isabelle · 667  
 Colbeaux Jean-Pierre · 593  
 Colle Caroline · 28  
 Collett Stephen · 443, 446, 447  
 Collier Richard · 266  
 Collin Magali · 190, 222  
 Collin Pierre Yves · 147  
 Collin Sylvie · 68  
 Collon Pauline · 625  
 Collot Jean Yves · 280  
 Collot Joseph · 220  
 Coltat Rémi · 220  
 Combes vincent · 444  
 Comte Florent · 658  
 Conand Clément · 193  
 Conesa Gilles · 98  
 Congy Cyril · 88  
 Conreau Alexandra · 354  
 Convertini Fabien · 505  
 Coppo Nicolas · 619  
 Cornard Jean Paul · 371  
 Cornée Annie · 539  
 Cornille Vincent · 69  
 Cornu Jean-Yves · 352, 356  
 Corrado Sveva · 262  
 Corrêa Iran Carlos Stalliviere · 306  
 Corrèe Thierry · 369  
 Corsini Michel · 162, 166, 172, 189, 227, 451, 454, 669  
 Corti Luca · 172  
 Cossonnet Catherine · 362, 365  
 Costa Stéphane · 75  
 Coubray Sylvie · 498  
 Couëffé Renaud · 42, 219, 231, 241  
 Couillet Armelle · 519  
 Coulibaly Yacouba · 616  
 Coulombier Thibault · 73  
 Coulon Hervé · 542  
 Courcot Lucie · 69, 348

Cournède Cécile · 426  
 Courrioux Gabriel · 209, 671  
 Courrioux Grabiel · 619, 632, 666, 676  
 Courtot Leïla · 572  
 Coutelier Clément · 658  
 Couzinie Simon · 181  
 Crapoulet Adrien · 88  
 Crasquin Sylvie · 293  
 Crave Alain · 591  
 Crémades Antoine · 224  
 Créon Laura · 719  
 Crépin Benoît · 168  
 Cresswell Derren · 258  
 Crêteur Yves · 502  
 Creton Benoît · 482  
 Cretu Magdalena · 262  
 Crevecoeur Isabelle · 528  
 Criquet Justine · 371  
 Crouzet Christian · 78  
 Cubizolle Hervé · 501  
 Curie Julien · 499  
 Cuvelier Jessie · 535, 536, 537, 540, 551

## D

Dabard Marie-Pierre · 331  
 Daburon Anaïs · 74  
 Dagħdevirenian Laurent · 84  
 Daif Menana · 341, 445  
 Dandurand Grégory · 500, 611  
 Danelian Taniel · 294, 310, 316  
 Dantas Elton · 54  
 Danzelle Julien · 412  
 Dapoigny Arnaud · 368  
 Darnet Mathieu · 619, 666  
 Darras Thomas · 621  
 Daupley Xavier · 683  
 Dauteuil Olivier · 591  
 Dauvin Jean-Claude · 418  
 David Guimolaire Nkouathio · 577  
 Daynac Jimmy · 414  
 De Bakker Anouk · 73  
 De Danieli Sébastien · 636  
 De Grissac Bruno · 581  
 De Kermadec Claire · 539  
 De Lumley Henry · 517  
 De Montety Véronique · 585  
 De Rafelis Marc · 644  
 De Ruffray Sophie · 519  
 De Saint-Blanquat Michel · 702, 704  
 De Sigoyer Julia · 588  
 De Vleeschouwer François · 364  
 De Wever Patrick · 539  
 Debaecker Sophie · 714  
 Dechamps Mathieu · 14  
 Deconinck Jean-François · 403, 408, 644  
 Decrée Sophie · 58, 127

- Defive Emmanuelle · 501  
 Deiller Piérig · 446, 447  
 Dejean Mélanie · 698  
 Dekoninck Augustin · 38, 58, 448  
 Del Ben Anna · 602  
 Delagnes Anne · 8  
 Delanghe Doriane · 78  
 Delangle Cyrille · 169  
 Delarue Frédéric · 637  
 Delaunay Antoine · 53  
 Delcaillau Bernard · 388, 596  
 Delegrange Alice · 69  
 Deleplancque Benoit · 612  
 Delescluse Matthias · 249  
 Delhaye-Prat Vincent · 20, 26, 47  
 Delisle François · 519  
 Delmas Magali · 709  
 Deloule Etienne · 325, 472  
 Delpech Guillaume · 236, 432  
 Delpeux Sandrine · 62, 63  
 Delrue Laure · 540  
 Demory François · 116, 420  
 Denayer Julien · 547, 551  
 Dendievel André-Marie · 501  
 Denèle Yoann · 159, 163, 221  
 Deniaud Yann · 74  
 Denis Lionel · 69  
 Dennielou Bernard · 79  
 Denys Axel · 479  
 Deparis Jacques · 623  
 Dequiedt Samuel · 524  
 Dera Guillaume · 55  
 Derdour Abdessamed · 573  
 Derenne Sylvie · 637  
 Deroin Jean-Paul · 87, 553  
 Derycke Virginie · 461  
 Desanois Louis · 449  
 Desaulty Anne-Marie · 690  
 Descamps Fanny · 148, 563  
 Deschamps Anne · 554  
 Deschamps Pierre · 424  
 Descholdt Laurent · 502, 503  
 Desjardins Thierry · 406  
 Desmet Marc · 365  
 Desoutter Samuel · 502  
 Despinois Frank · 248, 250, 262, 269  
 Desprat Stéphanie · 313  
 Desrosiers Pierre · 527  
 Dessales Hélène · 493, 588  
 Dessart François · 538  
 Destandau Emilie · 363  
 Detollenaere Tom · 268  
 Develle Anne-Lise · 514  
 Devillez Julien · 295  
 Devleeschouwer Xavier · 297, 415, 416  
 Devos Alain · 552, 553  
 Dewez Thomas · 632  
 Dezecache Camille · 366  
 Dezileau Laurent · 86  
 Dhifaoui Rabeb · 238  
 Di Giovanni Christian · 363  
 Diacre Aurélie · 363  
 Diallo Mamadoujan · 450  
 Dias Nuno · 269  
 Dietre Benjamin · 501  
 Dillmann Philippe · 492  
 Dimiza Margarita · 303, 319  
 Dinc Gulce · 93, 592  
 Ding Weiwei · 260  
 Diot Hervé · 162  
 Djaiz Fouad · 404  
 Djerosem Félix · 194  
 Do Couto Damien · 18, 28, 229, 602  
 Dode Coralie · 582  
 Dofal Anthony · 219  
 Doin Marie-Pierre · 378  
 Dominguez Stéphane · 202, 601  
 Dominique Marguerie · 527  
 Dommergues Jean-Louis · 410  
 Donnadieu Yannick · 300, 405  
 Donze Frederic · 93, 107  
 Dorador Javier · 313  
 Dörr Wolfgang · 348  
 Douay Francis · 342  
 Doublier Michael Patrick · 674  
 Dour Maxime · 698  
 Dourlat Estelle · 668  
 Dousset Sylvie · 354  
 Douville Eric · 368  
 Dovchintseren Dagvasuren · 195  
 Doyen Elise · 508  
 Droz Bernard · 574  
 Droz Laurence · 590  
 Druguet Elena · 704  
 Dubacq Benoît · 208, 430  
 Dubois Clémence · 343  
 Dubois Frédéric · 130  
 Dubois Michel · 165, 169, 343, 476, 486, 534, 536, 649,  
     651, 664, 688, 691  
 Dubois Pierre · 188  
 Ducassou Céline · 9, 10, 47, 409  
 Ducassou Emmanuelle · 24, 96, 98, 100, 101, 311, 317  
 Duchêne Stéphanie · 157, 158, 456  
 Duclaux Guillaume · 413  
 Ducoux Maxime · 190, 196, 218, 222  
 Ducreux Laure · 623  
 Dufeu Val · 504  
 Dufournet Annabelle · 512  
 Dufrenoy pierrick · 353  
 Dugué Olivier · 385, 387, 388  
 Duguet Timothée · 75  
 Duhamel-Achin Isabelle · 690  
 Dumont Emmanuel · 368  
 Dumont Marc · 623  
 Dumont Thierry · 708  
 Dumoulin David · 371  
 Dunham Audrey · 594  
 Duong Gwendoline · 69

Duperret Anne · 75, 593  
 Dupont Jean-Paul · 630  
 Dupont Nicolas · 164  
 Duprat Josette · 311  
 Dupré Stéphanie · 103  
 Dupuis Christian · 27  
 Dupuis Matthieu · 93, 107  
 Dupuis Quentin · 72  
 Dupuy Alain · 581  
 Dupuy Margaux · 575  
 Duquennoy Julien · 452, 626  
 Durand Cyril · 169, 170  
 Durantez Pilar · 364  
 Duranthon Francis · 611  
 Duringer philippe · 662  
 Durlet Christophe · 410, 625  
 Durrenmath Gilles · 505  
 Dusséaux Camille · 165  
 Dutilleul Jade · 278  
 Duverger Eric · 572  
 Dyja-Person Vanessa · 719

## E

Echassoux Anna · 517  
 Echevarria Guillaume · 358  
 Edel Jean Bernard · 178  
 Eglinger Aurélien · 444, 466, 472  
 Egoroff Grégoire · 539  
 Ehrhold Axel · 131, 138, 421  
 Eklund Olav · 192  
 El Albani Abderrazak · 16, 321, 330, 331  
 El Bakili Asmae · 166, 451  
 El Bamiki Radouan · 11, 12  
 El Boukhari Hanane · 113  
 El Hajj Layla · 64  
 El Hammouti Kamel · 431  
 El Hmidi Khalid · 410  
 El Houicha Mohammed · 173, 442  
 El Meknassi Sofia · 337  
 El Ouariti Salem · 113  
 Elliot Mary · 590  
 Ellouz-Zimmermann Nadine · 96  
 Elongo Vanessa · 239, 438  
 Engrand Cécile · 391  
 Ennih Nasser · 716  
 Enrico Maxime · 364  
 Epin Marie-Eva · 220, 250  
 Eric Gloaguen · 160, 469  
 Erostate Mélanie · 576  
 Erragragui Mohamed · 128  
 Erwan Hallot · 9  
 Escande Vanessa · 572  
 Escarguel Gilles · 298, 337  
 Espinosa Eve · 526  
 Espurt Nicolas · 223, 679  
 Essamoud Rachid · 13

Essid Amira · 76, 90  
 Estrade Guillaume · 434, 702, 703  
 Etheve Nathalie · 233  
 Etienne David · 508  
 Ettien Jean Baptiste · 351  
 Eva Elena · 708  
 Evain Mikael · 269  
 Expedition 367-368 Scientists IODP · 260, 262  
 Eynaud Frédérique · 312, 389, 401  
 Eyrolle Frédérique · 362, 365  
 Eyssautier Stéphanie · 652

## F

Fabregas Natacha · 24, 52, 99  
 Faccenna Claudio · 199, 255  
 Fadel Alexandre · 323  
 Fagel Nathalie · 404, 431  
 Faisse Camille · 490  
 Faivre Quentin · 418  
 Falguères Christophe · 424  
 Fanget Bernard · 508  
 Fara Emmanuel · 337  
 Farrant Andrew · 627  
 Faucher Agathe · 234  
 Faucon Michel-Pierre · 355, 357  
 Fauquembergue Kelly · 24, 100, 101, 317  
 Faure Michel · 154, 155, 175, 441  
 Favier Alexiane · 129, 669  
 Favretto Cristini Nathalie · 554  
 Faÿ-Gomord Ophélie · 144, 147  
 Fayolle Etienne · 118  
 Fellah Ahmed Hamza · 66  
 Fenart Pascal · 215, 572  
 Feneyrol Julien · 466  
 Feng Qinglai · 309  
 Feniès Hugues · 89, 142  
 Ferdinand Adélaïde · 601  
 Ferrah Yassine · 578  
 Ferrand Thomas · 567  
 Ferreiro Mählmann Rafael · 109, 282, 283, 674  
 Ferretti Patrizia · 313  
 Ferrière Jacky · 247, 253  
 Ferry Jean-Noël · 61, 248, 405  
 Ferry Serge · 102, 141  
 Feuillet Nathalie · 285, 714  
 Figueiral Isabel · 509  
 Filipot Jean Francois · 71  
 Filippi Marco · 167, 172  
 Fillon Charlotte · 50, 190  
 Filocamo Francesca · 493  
 Flament Morgane · 452  
 Flaux Clément · 490  
 Fléhoc Christine · 27  
 Fleury Jules · 212  
 Florsch Nicolas · 525  
 Foliot Lorna · 368

- Ford Mary · 46, 184, 210, 224, 251  
 Forel Marie-Béatrice · 293, 314  
 Forest Vianney · 509  
 Forget François · 392  
 Forsoni Maxime · 452  
 Fossou Jean-Luc Hervé Kouadio · 455  
 Foster Ian · 324, 326  
 Fougeré Laëtitia · 363  
 Foulland Eric · 402  
 Fourel François · 722  
 Fournier Eric · 461  
 Fournier François · 31, 569, 570  
 Fournier Léa · 271  
 Fralick Philip · 329, 334  
 Francescangeli Fabio · 67, 77, 487  
 Franck Christian · 613  
 Francois Thomas · 40, 217  
 Franke Christine · 39, 344  
 Frau Camille · 61, 300  
 Fraysse Fabrice · 358  
 Frédéric Hatert · 38  
 Frédérique Eynaud · 414  
 Frison Pierre-Louis · 374, 377  
 Frizon De Lamotte Dominique · 173, 197, 225, 233, 442  
 Frogé Jean-Luc · 720  
 Frontalini Fabrizio · 67  
 Froneau Gilles · 650, 652, 653  
 Fruneau Bénédicte · 378
- Garziglia Sébastien · 123  
 Gasc Julien · 567  
 Gasparini Marta · 672  
 Gaspéri Johnny · 360  
 Gaucher Eric · 135, 190, 235, 625  
 Gaullier Virginie · 247, 252, 253, 265, 386, 387, 600  
 Gautheron Cécile · 35, 58, 198, 413, 432  
 Gauthier Arnaud · 169, 343, 477, 649, 651, 654, 681, 691, 692  
 Gauthier Bertrand · 144  
 Gavazzi Bruno · 507  
 Gaw Viola · 270  
 Gay Aurélien · 129, 130, 136  
 Gébelin Aude · 165, 181  
 Geli Louis · 103  
 Gelin Frabçois · 139  
 Genge Marie · 279  
 Gensbeitel Christian · 496, 497, 658  
 Genter Albert · 662  
 Genty Dominique · 529  
 Geoffroy Laurent · 248  
 Georgelin Thomas · 327  
 Géraud Yves · 141, 146, 278  
 Geroudet Marie-Madeleine · 540  
 Gerrienne Philippe · 291  
 Geze Raymond · 64  
 Gherbi Abdelkarim · 617  
 Ghesquière Guillaume · 88  
 Ghienne Jean-François · 173, 263, 442  
 Ghinet alina · 353  
 Gigon Joséphine · 325  
 Giguet-Covex Charline · 508  
 Gillard Morgane · 244  
 Gillet Hervé · 24, 79, 99, 117  
 Gimeno Vivès Oriol · 197, 225  
 Gindre-Chanu Laurent · 26  
 Giner Franck · 365  
 Giralt Santiago · 609  
 Girardclos Olivier · 526  
 Girardin Cyril · 643  
 Giraud Fabienne · 298  
 Giraudeau Jacques · 317, 401  
 Girault Igor · 615  
 Girault Jean-Baptiste · 42, 216  
 Giuliani Gaston · 719  
 Gloaguen Eric · 453, 457, 461  
 Glodny Johannes · 459  
 Gnanzou Allou · 455, 616  
 Godard Vincent · 590  
 Gogou Alexandra · 303, 319  
 Gomart Louise · 505  
 Gómez-Romeu Júlia · 233  
 Gommeaux Maxime · 652  
 Goncalves Philippe · 180, 464, 472  
 Gong Jian · 326  
 Gontharet Swanne · 69  
 Gonthier Eliane · 311  
 Gonzalez Catherine · 630  
 González-Lemos Saúl · 609

## G

- Gabeltaud Isabelle · 614  
 Gabriele Marzia · 505  
 Gadalia Alain · 666  
 Gagnaison Cyril · 14  
 Gaillard Morgane · 600  
 Gaillot Jeremie · 17  
 Galdies Johann · 296  
 Gallet Sylvain · 517  
 Galop Didier · 364  
 Galoyan Ghazar · 310  
 Gand Georges · 9  
 Gandelin muriel · 509  
 Gandois Laure · 364  
 Ganino Clément · 471  
 Ganne Jérôme · 163, 194, 716  
 Gaouzi Abdelaziz · 450  
 Gapais Denis · 469  
 Garambois Stéphane · 588  
 Garcia Jean-Pierre · 511, 524  
 Garcia Marta · 420  
 Gardien Véronique · 181  
 Gardin Silvia · 18  
 Garel Emilie · 575, 576  
 Garel Fanny · 566  
 Garel Sylvain · 27  
 Garlan Thierry · 65, 71, 82, 271, 389, 401, 414, 554

Goodbred Steve · 43, 44, 594, 595  
 Gorini Christian · 18, 25, 28, 255, 602  
 Gosso Guido · 167, 171, 172  
 Gouedji franck · 699  
 Gougeon Romain · 331  
 Gouin Jérôme · 441  
 Gourichon Lionel · 509  
 Gourmelen Claude · 238  
 Graham Rodney · 191  
 Grall Céline · 43, 44, 103, 594, 595, 678  
 Granai Salomé · 514  
 Grand Stéphanie · 541, 638, 642  
 Granjeon Didier · 18  
 Gransac Lise · 626  
 Grappone Michael J. · 627  
 Gras Antoine · 7  
 Grassi Kelly · 366  
 Gratuze Bernard · 505  
 Grauby Olivier · 189  
 Graveleau Fabien · 153, 168, 185, 186, 188, 200, 247, 253,  
     265, 286, 542, 596, 597, 601, 607, 617  
 Gravina Brad · 528  
 Grégoire Gwendoline · 131, 137, 138, 421  
 Grélaud Carine · 118  
 Gresselin Frédéric · 385  
 Grignard Pierre-Alexandre · 15, 213, 226  
 Grigoryan Araiyk · 310  
 Grimaud Jean-Louis · 44  
 Grosbois Cécile · 365  
 Grosheny Danièle · 102, 141  
 Gueguen Philippe · 588  
 Gueriau Pierre · 134  
 Guérin Guillaume · 528  
 Guerit Laure · 41  
 Guesdon Romain · 689  
 Guetty Thierry Philippe · 351  
 Guffon Théobald · 250  
 Guiastrennec-Faugas Léa · 79  
 Guibert Pierre · 496, 497, 658  
 Guibert Raphaëlle · 509  
 Guignard Jérémy · 567  
 Guigon Elodie · 360  
 Guilaine Jean · 505  
 Guilbaud Christelle · 598  
 Guillaume Martin · 676  
 Guillerme André · 368  
 Guillocheau François · 20, 36, 45, 47, 48, 50, 53, 56, 230,  
     254  
 Guillois Landry · 331, 408  
 Guillot François · 151, 169, 170  
 Guillot Stéphane · 471, 708  
 Guillou-Frottier Laurent · 457, 665, 676  
 Guinot Guillaume · 6  
 Guitiérrez Laura · 262  
 Guiyelgou Grace · 16  
 Gumiaux Charles · 159, 160, 196, 469  
 Gurriaran Rodolfo · 362  
 Gutierrez Morgane · 356  
 Gutscher Marc-Andre · 112

Guyétant Gaëlle · 537  
 Guyomard Patrick · 131, 138, 554

## H

Haas Jean Nicolas · 501  
 Hacker Bradley · 474  
 Hadadou Rafik · 684  
 Hadot Vincent · 486  
 Haissen Faouziya · 225  
 Haliotis Equipe · 72  
 Halkett Cédric · 361, 367  
 Hallal Nassim · 618  
 Hallek Faten · 90  
 Hallot Erwan · 470  
 Hamd Jihad · 132, 133  
 Hangau Jenica · 382  
 Hannion Ysoline · 633  
 Hannouche Mani · 578  
 Hanot Franck · 555, 556, 557  
 Hanquiez Vincent · 24, 52, 79, 98, 99, 101, 311  
 Hansson Sophia · 364  
 Haq Bilal · 25  
 Hasalová Pavlína · 179, 474  
 Hassan Rim · 311  
 Hatira Nouri · 58  
 Hauchard Emmanuel · 630  
 Haurine Frédéric · 121, 236  
 Hebert Ronan · 664, 670  
 Hechelski Marie · 353  
 Heilbronn Gloria · 203  
 Hejja Younes · 176, 700  
 Hélie Jean-François · 489  
 Hemelsdael Romain · 46, 619  
 Hendrayana Heru · 585  
 Henry Françoise · 69  
 Henry Pierre · 78, 103  
 Héquette Arnaud · 81, 88  
 Hernandez Bilbao Eider · 139  
 Hernandez Jérôme · 509  
 Hernández María José · 280  
 Hesselbo Stephen P. · 403  
 Heubeck Christoph · 324, 326  
 Higham Tom · 529  
 Hilairat Nadège · 567, 568, 717  
 Hippolyte Jean-Claude · 223  
 Hireche Saad · 104  
 Ho Sutieng · 95, 105  
 Hoareau Guilhem · 139, 213, 235  
 Hodel Florent · 716  
 Hoggmascall Nick · 18  
 Holden Caroline · 599  
 Holder Robert · 474  
 Hölttä Pentti · 192  
 Homann Martin · 324, 326, 329, 334  
 Homonnay Emmanuelle · 189, 227, 454  
 Hong Fei · 31, 569, 570

Hossain M. Saddam · 44  
 Hovland Martin · 105, 106  
 Hu Hsun-Ming · 517  
 Hu Jyr-Ching · 378  
 Hubé Daniel · 558, 559  
 Huby Emilie · 653  
 Hue Charline · 10  
 Huet Bastien · 17  
 Huguet Arnaud · 64, 65, 68  
 Hulin Guillaume · 502  
 Huneau Frédéric · 575, 576  
 Huret Emilia · 7  
 Hurtado christian · 54  
 Hurwitz Shaul · 713  
 Husson Eglantine · 619, 620  
 Husson Laurent · 198, 590  
 Huston David · 325  
 Huynh Hiep Xuan · 80, 381

## I

Iakovleva Alina · 27  
 Iker marcaida · 657  
 Ilicak Mehmet · 78  
 Imbert Patrice · 93, 95, 97, 105, 106, 107, 108, 110  
 Inoubli Mohamed Hedi · 90, 176, 425  
 Ireland Trevor · 332  
 Isambert Aude · 322, 344  
 Issautier Benoît · 19, 177, 209, 228, 264, 711  
 Isseini Moussa · 194  
 Ivanovsky Anastasia · 372  
 Izart Alain · 156  
 Izquierdo Llavall Esther · 422

## J

J. Ball Philip · 245  
 Jabbour Haddou · 176  
 Jaber Maguy · 327, 484  
 Jacob Jérémie · 27, 363, 508  
 Jacob Mathieu · 666  
 Jacob Thomas · 619, 633  
 Jacomet Suzanne · 505  
 Jacopin Bertrand · 572  
 Jacquemot Pierre · 327, 484  
 Jacques Alain · 549  
 Jacques-Marie Bardintzeff · 577  
 Jacquet Alain · 620  
 Jaillet Stéphane · 622  
 Jallot Luc · 522  
 Jamoussi Fakher · 58  
 Jan Gwilherm · 350  
 Janots Emilie · 479  
 Janowski Marianne · 198  
 Jarochowska Emilia · 124  
 Jarry Marc · 611

Jaunat jessy · 579  
 Jauvion Clement · 134, 299  
 Javel Jean-Baptiste · 496, 497, 658  
 Jean Borgomano · 24  
 Jean-Soro Liliane · 368  
 Jeffries Teressa · 301  
 Jenks jim · 337  
 Jerabek Petr · 474  
 Jérémie Melleton · 463, 480, 687  
 Jewison Ella · 216  
 Jézéquel Didier · 402  
 Jia Yingying · 203  
 Jiang Yingde · 439  
 Jiménez-Sánchez Montserrat · 609  
 Jing Zhicheng · 565  
 Joachimski Michael M. · 301  
 Joël Ntungwanayo · 438  
 Johannet Anne · 621, 630  
 Johansen Ståle · 273  
 Johnson Christopher A · 263  
 Jolivet laurent · 196, 199, 232, 255, 267, 433, 458  
 Jolivet Marc · 195, 203, 204  
 Jollivet-Castelot Martin · 247, 386  
 Jorda Christophe · 509  
 Jouet Gwenael · 421  
 Jouffray Fabrice · 172  
 Jouffroy-Bapicot Isabelle · 526  
 Joumes Margot · 52  
 Jourani Essaid · 113, 125  
 Jourde Herve · 585  
 Jourdon Anthony · 471  
 Jung Haemyeong · 435  
 Junique Thomas · 146  
 Jupin Johanna · 369  
 Juste Remy · 107

## K

Kahou Zia Steven Victoire Jonathan · 456  
 Kalifi Amir · 17  
 Kanari Eva · 639, 640  
 Karatajute-Talimaa Valentina · 301  
 Karner Gary D. · 263  
 Karpytchev mikhail · 43  
 Kass Mason Andrew · 713  
 Kaufmann Olivier · 164  
 Kazmierczak Elise · 200, 622  
 Kebi-Tsoumou Sage · 20, 47  
 Kemavo Anoumou · 345, 379  
 Ker Stephan · 123  
 Kere I. · 718  
 Kern Michel · 671  
 Khalidi Ahmed Yacine · 66  
 Khanbari Khaled · 257  
 Khaska Somar · 580  
 Khatib Samir · 517  
 Kherbouche Farid · 529

Killingsworth Bryan · 326, 328, 329, 332, 335, 337  
 Kim Jung-Hyun · 55  
 Klaeschen Dirk · 270  
 Klein Emmanuelle · 613  
 Klingelhoefer Frauke · 111, 112  
 Klinger Yann · 588  
 Klügel Andreas · 450  
 Kluska Jean-Michel · 139  
 Knoll Andrew H. · 323  
 Köhler Inga · 324  
 Konhauser Kurt · 324, 329, 335  
 Korja Annakaisa · 192  
 Korja Toivo · 192  
 Kouli Katerina · 319  
 Kowalewski Isabelle · 641  
 Kowalski Frédéric · 681  
 Kranis Haralambos · 251  
 Kroner Uwe · 459  
 Ksibi Imed · 632  
 Kuchaida Jean-Pierre · 682  
 Kumar Basu · 594  
 Kurucz Sophie · 329  
 Kylander-Clark Andrew · 443, 474

## L

Labat Cloé · 581  
 Labeau Yannis · 666  
 Labrousse Loïc · 216, 567  
 Lach Philippe · 155, 463, 480, 687, 690, 701  
 Lachassagne Patrick · 585  
 Lachet veronique · 482  
 Lacoste Aurélien · 612  
 Lacour Jean-Luc · 529  
 Lacquement Frederic · 153, 219, 610, 623, 624, 628, 629, 709  
 Lacrampe-Cuyaubère François · 528  
 Ladant Jean-Baptiste · 405  
 Ladouche Bernard · 619, 676  
 Lafont François · 29  
 Lagabrielle Yves · 57  
 Laggoun-Défarge Fatima · 62, 63  
 Lagroix France · 39  
 Lahaye Christelle · 528  
 Lallemand Serge · 136  
 Lalonde Stefan · 324, 326, 329, 332, 334  
 Lalonde Stefan V. · 335  
 Lam Chi Nguyen · 80, 381  
 Lamarche Juliette · 122, 212  
 Lamotte Claudine · 619, 620  
 Lamotte Didier · 526  
 Lamoureux-Var Violaine · 641  
 Lamouri Bachir · 404, 431  
 Lanari Pierre · 151, 169, 170, 458, 471  
 Lancelot Laurent · 681  
 Lançon Mathieu · 487, 502  
 Landois Rémi · 511

Landrein Philippe · 7, 126  
 Langrand Christopher · 568, 717  
 Lanson Martine · 479  
 Lanteaume Cyprien · 61, 300  
 Laouafa Farid · 683  
 Lapuyade Joanna · 98  
 Laratte Sébastien · 552, 553  
 Lardeaux Jean-Marc · 166, 167, 171, 172, 178, 227, 451, 454, 505, 669  
 Lardeux Cédric · 345, 379, 382  
 Larrey Marine · 135, 229  
 Larroque François · 581  
 Larsen Hans-Christian · 260  
 Laspatzis Sophie · 256  
 Lasseur Eric · 19, 35, 36, 42, 48, 50, 121, 144, 147, 177, 217, 228, 230, 264, 387  
 Latapy Alexa · 81  
 Laufek Frantisek · 442  
 Laugié Marie · 300, 405  
 Launay Gaetan · 457  
 Laurent Dimitri · 625  
 Laurent Oscar · 181  
 Laurent Valentin · 458  
 Laverlochere Carole · 693  
 Lavina Pierre · 688  
 Le Bayon Benjamin · 159, 160, 180  
 Le Bayon Claire · 642  
 Le Béon Maryline · 378, 596  
 Le Coustumer Philippe · 477, 649, 651, 654  
 Le Dantec Nicolas · 71  
 Le Gal La Salle Corinne · 580  
 Le Goff Elisabeth · 620, 676  
 Le Goff johan · 24, 317  
 Le Guillou Corentin · 327  
 Le Maire Pauline · 246, 423  
 Le Moigne Benoit · 623  
 Le Pourhiet Laetitia · 198, 268  
 Le Roux Gaël · 364, 400  
 Le Roux Olivier · 583  
 Le Roy Pascal · 421  
 Le Texier Marion · 519  
 Le Vigouroux Philippe · 562  
 Lebatard Anne-Elisabeth · 116  
 Lebeau Oanez · 329, 334  
 Lebeau Thierry · 356  
 Lebedev Sergei · 270  
 Leblé Geoffrey · 512  
 Lebon Matthieu · 513  
 Leboulanger Christophe · 402  
 Lebrun Jean-Frédéric · 136  
 Leclerc Priscilla · 96  
 Lecomte Amélie · 683  
 Lecomte-Schmitt Blandine · 503  
 Lecuyer Christophe · 722  
 Ledésert Béatrice · 664, 670, 672  
 Ledoux Estelle · 568  
 Lefèuvre Alain · 366  
 Lefebvre Bertrand · 715  
 Lefebvre Marie G · 459

Lefeuvre Nicolas · 190  
 Legendre Yoan · 623  
 Legoff Elizabeth · 619  
 Legros Hélène · 719  
 Lejay Alain · 139  
 Lekele Baghekema Stellina · 330  
 Lelarge Norman · 650  
 Leleu Sophie · 177, 264  
 Lemal Sandrine · 684, 685  
 Lemgruber Traby Adriana · 679  
 Lemiere Bruno · 461  
 Lemilbeau Claude · 62, 63, 363, 508  
 Lemirre Baptiste · 161, 177  
 Lemonnier Kévin · 406  
 Lenhardt Florence · 582  
 Lenoir Louise · 705  
 Léonide Philippe · 122, 212  
 Leoutre Eric · 672  
 Lepage Hugo · 362, 365  
 Lepot Kevin · 323, 330  
 Leprêtre Angélique · 269  
 Leprêtre Rémi · 173, 197, 225, 442  
 Lerouge Catherine · 27  
 Leroux Estelle · 18, 602  
 Leroux Hughes · 393  
 Leroy Inès · 515  
 Leroy Sylvie · 255, 257, 267, 269  
 Leroyer Chantal · 498  
 Le-Saout Gwenn · 21  
 Lescanne Marc · 248, 257, 259  
 Lesourd Sandric · 418  
 Lestel Laurence · 360  
 Lesven ludovic · 361  
 Levacher Daniel · 659  
 Lévéque Francois · 491  
 Lewicki Jennifer · 713  
 Lexa Ondrej · 178, 443  
 Lezine Anne-Marie · 406  
 Li Haibing · 598  
 Li Xian-Hua · 170  
 Liang Yao · 249  
 Limam Hicham · 66  
 Linco Dino · 382  
 Link Gaétan · 702, 703  
 Littke Ralf · 64  
 Lloret Emily · 346  
 Llubes Muriel · 525  
 Lofi Johanna · 252  
 Loget Nicolas · 35, 42, 48, 198, 216  
 Loi Alfredo · 331  
 Loisy Corinne · 132, 133, 583  
 Loparev Artiom · 49  
 Lopez Michel · 21, 23, 129  
 Lopez Simon · 632, 671, 676  
 Lorgeoux Catherine · 360  
 Lorin Yann · 503  
 Lotout Caroline · 174, 460, 467  
 Louis Pauline · 626  
 Loury Chloé · 471

Louterbach Mélanie · 54  
 Louvel brice · 353  
 Lu Chia-Yu · 202, 205  
 Luby Sylvain · 142  
 Lucaleau Francis · 602  
 Lüders Volker · 449  
 Lukas Dagmar · 519  
 Lusven André · 82  
 Lutfalla Suzanne · 636, 642  
 Lutz Pascale · 688  
 Lymer Gaël · 252, 258, 281, 600

---

## M

Maacha Lhou · 435  
 Macouin Mélina · 344, 716  
 Magoua Mohamed · 448  
 Magri Fabien · 676  
 Maguregui Maite · 657  
 Mahan Kevin · 464  
 Mahieux Geoffroy · 109, 119, 275, 276, 277, 282, 283, 424  
 Maiga Mahamadou Hachimi · 536  
 Maillard Agnès · 219, 231, 247, 252  
 Maillet grégoire · 75  
 Maillot Bertrand · 187  
 Maison Tatiana · 281, 282, 283, 674  
 Maksoud Sibelle · 64  
 Malartre Fabrice · 46, 141  
 Malavieille Jacques · 201, 202, 597, 601  
 Malet David · 230  
 Malet Emmanuel · 508  
 Malié Pierre · 109, 119, 282, 283, 284, 674  
 Malinverno Elisa · 303  
 Mallol Carolina · 528  
 Malusà Marco Giovanni · 708  
 Mamindy-Pajany Yannick · 347  
 Manar Ahmed · 176, 425, 603, 700  
 Manatschal Gianreto · 220, 232, 240, 244, 250, 263  
 Manche Yannick · 620  
 Mandeng-Yogo Magloire · 406  
 Manighetti Isabelle · 597, 601  
 Mansoura Moez · 90  
 Marasa Hélène · 160  
 Marc Munsch · 246, 423, 507  
 Marchand Emilie · 21, 22, 23  
 Marchelli Marion · 163  
 Marches Elodie · 32, 82, 131, 138, 271, 401, 414  
 Marçot Nathalie · 624  
 Marcoux Eric · 441  
 Margueret Sarah · 672  
 Marignac Christian · 440, 698  
 Marin Béatrice · 354, 579  
 Marin Moreno Hector · 261  
 Marin-Carbonne Johanna · 333  
 Marquer Didier · 180  
 Marquer Laurent · 364  
 Marsset Tania · 123

- Martelat Jean-Emmanuel · 429  
 Martelet Guillaume · 154, 623  
 Martin Bernard · 651  
 Martin Fabiana · 615  
 Martin Sophie · 509  
 Martínez Francisco J. · 468  
 Martinez Mathieu · 407, 408  
 Martinez Philippe · 65  
 Mary Flore · 110  
 Mary Yannick · 312  
 Masalehdani Naze Nancy · 686  
 Masini Emmanuel · 135, 190, 196, 211, 218, 222, 229, 232, 233, 240, 245, 251, 259, 267  
 Masrour Aïssa · 128  
 Masse Jean-Pierre · 300  
 Masse Justine · 343  
 Massei Nicolas · 630  
 Massimo Bellucci · 602  
 Massinissa Benabdellouahed · 111, 112, 385  
 Masson Eric · 380, 660  
 Masson Florian · 633  
 Masson Roland · 671  
 Mathé Vivien · 490, 491  
 Mathey Camie · 453  
 Mathias Xavier · 554  
 Mathieu olivier · 410, 524  
 Mattioli Emanuela · 298, 304, 315  
 Maurin Caroline · 74  
 Mavel Joris · 542, 617  
 Maxwell Erin · 722  
 Mayoral Alfredo · 514  
 Mazet Sylvain · 519  
 Mazier Florence · 364  
 Mcarthur Adam · 277  
 Mchugh Cecilia · 78  
 Mcintyre Timothy · 329  
 Méar Yann · 71, 418  
 Medina-Alcaide Maria Angeles · 523  
 Mehl Caroline · 83, 667  
 Meilliez Francis · 153, 542, 617  
 Meister Christian · 410  
 Mekkaoui Abderrahmane · 66  
 Melis Raphael · 162, 471  
 Meller Carola · 670  
 Melleton Jérémie · 155, 461, 690, 701  
 Menant Armel · 255  
 Menini Alessandro · 315  
 Mennad Abdelkader · 6  
 Ménot René-Pierre · 413  
 Mentes Iscen Merve · 316  
 Mercadier Julien · 325, 472  
 Mercier Fabienne · 572  
 Mercier Louison · 84  
 Mercuzot Mathilde · 9, 10, 409, 410  
 Merdas Brahim · 462  
 Merkel Sébastien · 567, 568, 717  
 Merle Olivier · 214  
 Merzeraud Gilles · 11, 12  
 Messager Erwan · 508  
 Metzger Edouard · 356  
 Meurisse-Fort Murielle · 487, 515  
 Meyer Bertrand · 198  
 Meyer Solène · 136  
 Mezzatesta Elodie · 516  
 Michau nicolas · 478, 483  
 Michaud François · 280  
 Michel Jonathan · 694  
 Michel Julien · 300  
 Michel Patrick · 394  
 Michel Veronique · 517  
 Michelot Jean-Luc · 368  
 Midende Gilbert · 437, 438, 465  
 Miegebielle veronique · 135, 229  
 Migeon Sébastien · 84, 110  
 Mignard salome · 65  
 Míková Jitka · 442, 446, 447  
 Milesi Gaétan · 673, 676  
 Millot Romain · 676  
 Minshull Timothy · 261, 270  
 Minster Gaspard · 71  
 Miras Yannick · 514  
 Missenard Yves · 236, 448  
 Moal-Darrigade Paul · 100, 317  
 Mocochain Ludovic · 51, 604  
 Mohammedi Yahia · 618  
 Mohn Geoffroy · 197, 225, 233, 240, 262  
 Mojtabid Meryem · 312  
 Moletta-Denat Marina · 138  
 Molli Giancarlo · 202  
 Mollier Alain · 352  
 Molliex Stéphane · 590  
 Moncel Marie-Hélène · 517  
 Mondal Dhiman Ranjan · 594  
 Monié Patrick · 38, 189, 234, 673  
 Monnet Claude · 294, 296  
 Monney Julien · 495  
 Monnier Eugénie · 452  
 Monnier Loïs · 463, 480, 687, 701  
 Montaggioni Lucien · 31  
 Montarges-Pelletier emmanuelle · 358  
 Monteleone Vanessa · 261  
 Montmartin Clément · 175  
 Morbidelli Alessandro · 395  
 Moreau Frédérique · 591  
 Moreau Laure · 572  
 Morelli Cesare · 437, 438, 465  
 Morena Pierre · 285  
 Moreno eva · 285  
 Morereau Amandine · 362, 365  
 Morillas Hector · 657  
 Morin Eugène · 528  
 Morin Julien · 203, 204  
 Morio Cédric · 363  
 Morio Olivier · 82, 554  
 Moris-Muttoni Benjamin · 464  
 Morlot Christophe · 478, 481, 719  
 Mosar Jon · 187  
 Mossner-Ruck Régine · 478, 483

Motelica-Heino Mikael · 343  
 Motte Geoffrey · 235  
 Motus Martin · 221  
 Mouazé Dominique · 85  
 Mouchel Jean-Marie · 360  
 Mouflih Mustapha · 113, 125  
 Mouhagir Mohamed · 450  
 Moulin Daphné · 670  
 Moulin Maryline · 269, 602  
 Mouillé Pierre Elie · 517  
 Mounic Stéphanie · 55  
 Mouralis Damase · 145, 519, 615  
 Mouret Aurelia · 356  
 Mourges Regis · 238  
 Mourier Brice · 365  
 Mourier David · 365  
 Mourlot Yannick · 55  
 Moussi Béchir · 58  
 Mouthereau Frédéric · 135, 193, 211, 216, 221, 229, 232, 242, 473  
 Mouttaqi Abdellah · 448  
 Moyen Jean-François · 181  
 Mulder Thierry · 24, 52, 65, 98, 99, 100, 101, 117, 311, 317  
 Muller Elodie · 332  
 Munch Philippe · 189, 454, 669, 673  
 Munnecke Axel · 114, 115, 124  
 Munoz Marguerite · 702, 703  
 Murat Anne · 131, 137, 138, 418, 421  
 Muriel Crouvoisier · 69  
 Murray-Hudson Mike · 591  
 Mustafa Sahin · 588  
 Muth Xavier · 528  
 Mylona Pantelitsa · 520

## N

Naba Seta · 426  
 Nachbaur Aude · 623  
 Nader Fadi H. · 64  
 Nait Bba Abdellah · 176, 425, 700  
 Nakamura Michihiko · 452  
 Nalpas Thierry · 237, 239  
 Nardin Elise · 221, 711  
 Nasraoui Mohamed · 688  
 Negrel Philippe · 711  
 Nehme Carole · 145, 519, 615, 627  
 Nemra Abdelkrim · 114, 115, 124  
 Néraudeau Didier · 331  
 Nguetnkam Jean-Pierre · 406  
 Nguidi Mohamed Amine · 113, 125  
 Nguyen van xuan · 347  
 Nicolas Manuel · 643  
 Nicolle Amandine · 71, 81  
 Nicollet Christian · 166, 451  
 Nicot Elisabeth · 560  
 Niculescu Simona · 80, 381, 382  
 Niedermann Samuel · 449

Nielsen Charlotte · 25  
 Nikkilä Kaisa · 192  
 Ninkabou Dia · 25  
 Nirrengarten Michael · 225, 260, 262  
 Nivart Adèle · 322  
 Nofal Salah · 572  
 Nonnotte Philippe · 324  
 Noret Aurélie · 7  
 Nouet Julius · 142  
 Noury Gildas · 632  
 Ntiharirizwa Seconde · 437, 438, 465  
 Ntungwanayo Joël · 437, 465  
 Nutz Alexis · 8

## O

Odonne François · 93, 107  
 Odyséyeu Equipe · 72  
 Oliot Emilien · 234, 464  
 Olivier Nicolas · 333, 337  
 Onfray Marylise · 521  
 Orange Christian · 543  
 Orange François · 517  
 Orange Ravachol Denise · 543  
 Ortiz Alexandre · 48, 50, 230  
 Oryan Bar · 678  
 Ottavi-Pupier Elsa · 452  
 Ouaiouchouche Salah · 617  
 Ouaja Mohamed · 30, 90  
 Ouali Mehadji Abdelkader · 66, 114, 115, 318  
 Ouattara Gbele · 616  
 Ouazzani-Touhami Mohamed · 227, 454  
 Ouddane Baghdad · 348  
 Oudoire Thierry · 168, 537, 551

## P

Pacyna Daniel · 694  
 Padron Crélia · 136  
 Pagel Maurice · 7, 126, 472  
 Pain Maelys · 93, 107  
 Painchault Aude · 145, 519  
 Pakta Raphaël · 16  
 Pan Jiawei · 598  
 Panagiotaropoulos Constantine · 319  
 Panagiotopoulos Ioannis · 319  
 Pannet Pierre · 633  
 Paola Christopher · 44  
 Papier Séverine · 533  
 Paquet Fabien · 49, 247, 385, 386, 387  
 Paquette Jean-Louis · 163, 180  
 Parat Fleurice · 11  
 Parize Olivier · 604  
 Parizot Oriane · 236, 448  
 Pasqualini Antoine · 513  
 Pasqualini Vanina · 576

- Pasquier Virgil · 51  
 Pastier Anne-Morwenn · 591  
 Patault Edouard · 39  
 Pathier Erwan · 378  
 Paton Douglas · 266  
 Patrier Patricia · 89, 142  
 Paul Anne · 708  
 Paulin Fabienne · 544  
 Peake Rebecca · 498  
 Pecoits Ernesto · 332  
 Pedersen Helle A. · 708  
 Pedoja Kevin · 590  
 Peiffert Chantal · 440  
 Peinetti Alessandro · 522  
 Peiry Jean-Luc · 514  
 Pellen Romain · 602  
 Pellenard Pierre · 9, 10, 403, 409, 410  
 Pelleter Ewan · 123  
 Pelt Eric · 446, 447  
 Peltier Aline · 720  
 Penaud Aurélie · 312  
 Pereira-Machado Viviane · 630  
 Perello Marie-Claire · 100, 101  
 Perez-Ruzafa Angel · 86  
 Perier Vincent · 82  
 Perret Julien · 466  
 Perrin Clément · 202  
 Perrin José · 623  
 Perrin Mireille · 116  
 Petit Anélia · 583  
 Petit Carole · 471  
 Petit Christophe · 529  
 Peyrefitte Aurélie · 219  
 Pham Thi Lan · 87  
 Phan Thi Thu Hong · 366  
 Philippe Sylvie · 348  
 Philippot Pascal · 322, 332, 335  
 Phillippe Sylvie · 69  
 Phung Chantelle · 108  
 Picard Christian · 699  
 Picault Maxime · 441  
 Picazo Suzanne · 259  
 Pichat Alexandre · 26  
 Pickering Jennifer · 44  
 Picon Philippe · 572  
 Picornell Virginie · 672  
 Pierre Guillaume · 63  
 Pierre marion · 689  
 Pierre Trap · 180, 464  
 Pierson-Wickmann Anne-Catherine · 9, 409  
 Pignatelli Isabella · 719  
 Pik Raphaël · 42, 216, 224, 242, 255, 257  
 Pillot Daniel · 641  
 Pin Christian · 151  
 Pinel Virginie · 720  
 Pinna-Jamme Rosella · 432  
 Pinto Filipe · 440  
 Pironon Jacques · 481, 625, 719  
 Pistre Séverin · 572, 621  
 Pitra Pavel · 174, 429, 460, 467, 468  
 Pittet Bernard · 298, 304, 715  
 Plancq Julien · 298  
 Platel Jean-Pierre · 581  
 Pochet Manon · 130  
 Pochon Anthony · 469, 687, 690  
 Podrelli Silvia · 708  
 Pohl Alexandre · 300, 411  
 Poignant Loïk · 388  
 Poirier Dominique · 350  
 Poirier Isabelle · 131, 137, 138  
 Poisson Caillault Emilie · 366, 367  
 Poitrenaud Thomas · 152  
 Poizot Emmanuel · 418  
 Polanco-Martinez Josue M. · 313  
 Polette France · 331  
 Poli Emmanuelle · 100, 101, 300  
 Pons-Branchu Edwige · 368, 523  
 Ponte Jean-Pierre · 53  
 Poort Jeffrey · 602  
 Portela Melanie · 77  
 Portier Eric · 89, 142  
 Portier Nolwenn · 591  
 Potdevin Jean-Luc · 129  
 Potel Sébastien · 109, 119, 282, 283, 674  
 Pottier Bernard · 80, 381  
 Poujol Marc · 9, 10, 47, 155, 165, 174, 287, 331, 453, 456,  
     460, 465, 467, 469, 470, 718  
 Poulenard Jérôme · 68, 508  
 Poulicac Aymeric · 470  
 Pourret Olivier · 355  
 Pouvreau Nicolas · 81  
 Powell Roger · 179  
 Pozzi Jean-Pierre · 424  
 Prada Manel · 270  
 Pradeau Jean-Victor · 495  
 Praeg Daniel · 110  
 Principaud Mélanie · 98  
 Privalov Vitaliy · 481  
 Privat Maëlys · 452  
 Probst Anne · 364  
 Prognon Caroline · 623, 628  
 Prognon François · 629, 709  
 Proust Jean-Noël · 237, 239, 280  
 Pryce Thomas Oliver · 492  
 Prygiel Emilie · 367  
 Prygiel Jean · 366, 367, 372  
 Pubellier Manuel · 249
- 
- Q**
- Qiu Dan · 286  
 Quéré Céline · 529  
 Quesne didier · 141  
 Quesnel Florence · 27, 385  
 Quesnel Yoann · 420  
 Quijada Melesio · 61, 67

Quiles Anita · 523  
Quiquerez Amélie · 511, 524

## R

Rabaute Alain · 110  
Rabineau Marina · 18, 51, 602  
Racek Martin · 179, 474  
Raharison Fanja-Emeline · 626  
Raimbourg Hugues · 175  
Raingeard Anne · 623, 628, 629  
Raïsson Francois · 55, 405  
Rajapara Haresh · 594  
Raji Otmane · 86  
Ramadan Ghanem · 691  
Rambeau Claire · 116  
Rämö Osmo Tapani · 192  
Ranché Christophe · 509  
Randi Aurélien · 481, 482, 483  
Randon Carine · 318  
Randriamamonjy Sitraka · 356  
Ranjard Lionel · 524  
Rao Gang · 596  
Rapilly Martin · 345, 379  
Raterron Paul · 567  
Ratzov Gueorgui · 285  
Raux Jean-Jacques · 649, 651  
Ravier Edouard · 409  
Raynal Jean-Paul · 501  
Razin Philippe · 118, 177, 264  
Rebay Gisella · 171, 172  
Reche Joan · 468  
Recourt Philippe · 170, 486, 534  
Recouvreur Audrey · 24, 52, 99, 100, 117  
Regard Vincent · 75  
Regnier Sylvie · 316  
Rehman Taib Ur · 116  
Reijmer John · 24  
Rémy Isabelle · 509  
Renaud Franck · 508  
Renaud Toullec · 109  
Reninger Pierre Alexandre · 623, 628, 629  
Reston Tim · 258  
Reston Timothy · 270  
Révillon Sidonie · 51  
Rey-Coyrehourcq Sébastien · 519  
Reynaud Jean-Yves · 16, 17, 30, 61, 90, 274, 279, 287  
Rezouki Ibtissam · 176, 425, 603  
Ribes Charlotte · 250, 263  
Ribouleau Armelle · 61, 321, 323, 330, 487  
Riboulot vincent · 123  
Rica Brunilda · 692  
Ricciardi Frédéric · 17  
Richard Antonin · 325, 719  
Richard Thomas · 683  
Ricordel-Prognon Caroline · 610, 709  
Riding Robert · 329

Riera Rosine · 14  
Rieux Alissia · 85  
Rigane Adel · 238  
Rigollet Christophe · 675  
Ringenbach Jean-Claude · 191, 251, 592  
Riou Brieuc · 369  
Riquelme Rodrigo · 456  
Riquier Laurent · 412  
Riquier Vincent · 500  
Ritz Jean-François · 676  
Roattino Thibault · 703  
Robaszynski Francis · 549  
Robbins Samuel · 245  
Robert François · 637  
Robert Pascal · 482  
Robin Cécile · 20, 36, 45, 47, 50, 53, 56, 203, 254  
Robin Valentin · 60  
Robin-Chanteloup Jean-Baptiste · 81  
Robion Philippe · 83, 672  
Roca Eduard · 233  
Rocco Kevin · 356  
Roche Amélie · 74  
Roche Emile · 27  
Rochette Pierre · 116, 420  
Rochez Gaëtan · 38  
Roda Manuel · 171  
Roddaz Martin · 54, 55  
Rodet Joël · 615, 627  
Rodrigues Stéphane · 612  
Rodrigues Teresa · 313  
Rodriguez Mathieu · 25  
Rodríguez-Rodríguez Laura · 609  
Rodriguez-Tovar Francisco-Javier · 313  
Roger Françoise · 180  
Roger Matthieu · 237  
Rohais Sébastien · 256  
Rolandone Frédérique · 602  
Rolland Jean-Marc · 698  
Rolland Yann · 413, 471  
Romagny Adrien · 189, 454  
Romano Christian · 597, 601  
Romer Rolf L · 449, 459  
Romey Carole · 420, 490  
Rosa Angelika · 568  
Roscher Marco · 459  
Rosebery Juliette · 350  
Rosenberg Claudio · 42, 208, 216, 242  
Rospabé mathieu · 716  
Rossignol Camille · 9, 10  
Rossignol Linda · 389, 414  
Rouai Mohamed · 425, 603  
Rouby Delphine · 41, 49, 56, 256  
Rougier Hélène · 528  
Rousse Sonia · 344, 426  
Rousseau Louis · 424  
Rousseau Mathieu · 218  
Roy-Barman Matthieu · 360, 368  
Rozenbaum Olivier · 62, 63  
Ruan Jiaoyang · 529

Rubino Jean-Loup · 17, 28, 29, 61, 84, 248, 604  
 Ruckebusch Cyril · 361  
 Rucquois Sébastien · 376  
 Rudant Jean-Paul · 345, 374, 379, 383  
 Ruelle Julien · 357  
 Ruffet Gilles · 165, 448, 469  
 Russo Séverine · 29  
 Rutman Philippine · 139

## S

Saad Ramez · 357  
 Sabatier Pierre · 68, 508  
 Sabine Marjolaine · 389, 401, 414  
 Saddiqi Omar · 448  
 Sadji Radouane · 114, 115, 124  
 Sahakyan Lilit · 310  
 Sahy Diana · 627  
 Saiag Jessica · 147  
 Saillard Marianne · 605  
 Saint-Martin Jean-Paul · 331  
 Saint-Martin Simona · 331  
 Saitoh Masafumi · 333  
 Sakellariou Dimitri · 247  
 Salardon Roland · 122  
 Saleh Farid · 715  
 Salimbeni Simone · 708  
 Salomon Hélène · 495  
 Saltel Marc · 581  
 Salvi Stefano · 434, 463, 480, 687, 701, 702  
 Samuel Desouter · 487  
 Sanchez Corinne · 490  
 Sanchez Goni Maria Fernanda · 313  
 Sanchidrian Jose Luis · 523  
 Sans Jofre Pierre · 326, 329, 334, 337, 715  
 Santoni Sébastien · 575, 576  
 Santos-Fischer Cristiane Bahi · 306  
 Sarazin Gerard · 402  
 Sarikaya Mehmet Akif · 615  
 Sarr Raphaël · 6  
 Saspiturry Nicolas · 118, 177, 209, 228, 264  
 Sassi Audrey · 524  
 Saurel Jean-Marie · 714  
 Sauter Daniel · 244  
 Sautter Violaine · 396  
 Savary Michaël · 630  
 Savignac Florence · 635, 639, 640  
 Scaillet Stéphane · 433, 458, 473  
 Scalabrin Carla · 103  
 Scaut Valentine · 297  
 Schaming Marc · 244  
 Schito Andrea · 262  
 Schmitt Francois · 265, 370  
 Schmitt Jean-Michel · 195  
 Schneider Jean-Luc · 369  
 Schnurle Philippe · 269  
 Schnyder Johann · 27, 409

Schoch Rainer · 722  
 Schubnel Alexandre · 567  
 Schulmann Karel · 173, 178, 179, 429, 439, 442, 443, 446, 447, 474  
 Schuster Mathieu · 8  
 Schwartz Stephane · 708  
 Scotes Christopher · 300  
 Sebag David · 638, 642  
 Sebaihi Sahar · 659  
 Seder Colomina Marina · 68  
 Seeber Leonardo · 44  
 Seibert Chloé · 285  
 Seifi sahar · 659  
 Sengelen Xavier · 672  
 Seoane Lucia · 525  
 Séranne Michel · 11, 12, 21, 22, 23, 215, 241, 619, 676  
 Serbeto Ibanez Francisco · 415  
 Serrand Anne-Sophie · 461  
 Serrano Julien · 158, 704  
 Serrano olivier · 19, 177, 230, 264  
 Servais Thomas · 291  
 Seydoux-Guillaume Anne-Magali · 472  
 Seyler Monique · 151, 310  
 Shannon Patrick · 270  
 Shao Qingfeng · 424  
 Shen Chuan-Chou · 517  
 Shmela Ahmad · 266  
 Sigwald Robin · 88  
 Silva Jacinto Ricardo · 79  
 Simien Frédéric · 556, 557  
 Simoes Martine · 598  
 Simon Brendan · 56, 254  
 Simon Francois-Xavier · 502  
 Simon Martin · 442  
 Simon Valeria · 449  
 Simonneau Anaëlle · 363, 364, 400, 508  
 Simplet Laure · 79  
 Sincavage Ryan · 44  
 Singhvi Ashok K · 594  
 Sizaret Stanislas · 160, 457  
 Skampa Elisavet · 319  
 Skirrow Roger · 325  
 Skourtos Emmanuel · 251  
 Skrubej Alexandra · 186  
 Slimak Ludovic · 529  
 Smaï Farid · 671  
 Small Christopher · 595  
 Smit Jeroen · 25  
 Smith Thierry · 27  
 Smittarello Delphine · 720  
 Solarino Stefano · 708  
 Soldner Jeremie · 443  
 Soliva Roger · 673, 676  
 Sordillett Dominique · 526  
 Sosson Marc · 310  
 Soucémarianadin Laure · 635, 636, 639, 640, 642, 643  
 Souksavatdy Viengkeo · 492  
 Souque Christine · 679  
 Soussi Mohamed · 30

Sow Aissatou Youssouph · 352  
 Spaggiari Luca · 172  
 Spalla Maria Iole · 167, 171, 172  
 Spangenberg Jorge E. · 304  
 Stab Martin · 255, 257  
 Steckler Michael · 43, 44, 594, 595, 678  
 Steer Philippe · 57  
 Steinsbo Knut-Gunnar · 28  
 Stephan Pierre · 490  
 Stéphane Dominguez · 597  
 Stephen Daniel · 337  
 Sternai Pietro · 199, 255  
 Sterpenich Jérôme · 478, 481, 482, 483, 719  
 Steurbaut Etienne · 416  
 Stevenson Carl · 258  
 Štípká Pavla · 179, 446, 447, 474  
 Stockli Daniel F. · 245  
 Storme Jean-Yves · 27, 416  
 Strak Vincent · 597  
 Stratford Dominic · 611  
 Strzerynski Pierre · 238, 705  
 Suan Guillaume · 315, 722  
 Suc Jean-Pierre · 604  
 Suchéraux-Marx Baptiste · 298  
 Sue Christian · 413  
 Sugitani Kenichiro · 330  
 Sultan Nabil · 123  
 Sun Min · 439  
 Superville Pierre-Jean · 371, 372  
 Swennen Rudy · 33, 132, 133, 144  
 Sylvie Noelle Djukem Fenguia · 577  
 Szczesna Marek · 442

## T

Taamallah marwa · 30  
 Taboada Alfredo · 130  
 Taborelli Pierre · 552, 553  
 Tabuce Rodolphe · 6  
 Tachikawa Kazuyo · 420  
 Tailame Anne-Lise · 623, 666  
 Taillefer Audrey · 673, 676  
 Tallobre Cédric · 69  
 Tamtam Fatima · 360  
 Tandjaoui Radia · 66, 318  
 Tandjaoui-Arif Radia · 318  
 Tartese Romain · 718  
 Team TRAM · 364  
 Teillet Thomas · 31, 569, 570  
 Teisserenc Roman · 364  
 Tendil Anthony · 61  
 Téreygeol Florian · 525  
 Ternois Sébastien · 224  
 Terrier Monique · 666  
 Tesauro Magdala · 199  
 Tessalina Svetlana · 332  
 Tessier bernadette · 85, 86, 385, 387

Theodorou Georgios · 319  
 Thibault Alexandre · 363  
 Thibault Nicolas · 410  
 Thiebault Thomas · 363  
 Thiéblemont Denis · 610  
 Thierry Vincent · 545, 655, 692  
 Thierry Yannick · 624  
 Thil François · 368  
 Thinon Isabelle · 219, 228, 230, 231, 232, 237, 239, 252,  
     264, 386, 387, 666  
 Thireau Véronique · 693  
 Thobie Marie · 329, 335  
 Thomachot-Schneider Céline · 146, 650, 652, 653  
 Thomas Audrey · 141  
 Thomas Jérôme · 561  
 Thomazo Christophe · 332, 333, 335, 337, 409, 412  
 Thoraval arthur · 579  
 Thoraval Catherine · 566  
 Timpa Sean · 329  
 Tissoux Hélène · 610, 623, 629, 709  
 Tobie Gabriel · 397, 721  
 Todisco Dominique · 145, 519, 527, 528, 615, 627  
 Tomasi simon · 259  
 Tondu Yohann · 406  
 Tong Si Son · 87  
 Touati Mounira · 584  
 Toucanne Samuel · 123, 389  
 Toulier Alix · 585  
 Toullec Renaud · 119, 486  
 Tourrière Bruno · 610, 629  
 Tournadour Elsa · 24, 52, 100  
 Trentesaux Alain · 16, 67, 74, 77, 88, 90  
 Triantafyllou Antoine · 716  
 Triantaphyllou Maria · 303, 319  
 Tribouillard Nicolas · 61, 129  
 Trindade Ricardo · 716  
 Trumbull Robert · 449  
 Tshibangu Jean-Pierre · 148, 533, 563  
 Tsiolakis Efthymios · 319  
 Tuduri Johann · 453  
 Tugend Julie · 218, 222, 233, 240, 245, 267  
 Tung Hsin · 378  
 Turcq Bruno · 406  
 Turuani Marion · 472  
 Twardzik Cedric · 606  
 Tzevahirtzian Athina · 32, 271

## U

Uehara Minoru · 420  
 Ueno Yuichiro · 333  
 Uesugi Masayuku · 452  
 Ulrich Marc · 446, 447  
 Uzel Jessica · 57

## V

Valensi Patricia · 517  
 Valladas Hélène · 523  
 Van Den Driessche Jean · 174, 460, 467, 468  
 Van Der Beek Peter · 413  
 Van Der Ent Anthony · 358  
 Van Der Woerd Jerome · 598  
 Van Kranendonk martin · 326, 332  
 Van Lichtervelde Marieke · 704  
 Van Vliet-Lanoe Brigitte · 593  
 Van Wees Jan-Diederik · 665  
 Van Zuilen Mark · 326  
 Vanardois Jonas · 180  
 Vandemeulebrouck Jean · 713  
 Vanderhaeghe Olivier · 181, 194, 701, 702, 703  
 Vandeveldé Ségolène · 529  
 Vandycke Sara · 148, 200, 549, 563, 593, 622  
 Vanwalscappel Bruno · 502  
 Varano Mariacristina · 145, 519  
 Varas German · 129  
 Vautier Franck · 514  
 Vautier Yannick · 626  
 Vazquez patricia · 146, 652, 653, 657  
 Vazquez Patricia · 146, 652, 653, 657  
 Vendeville Bruno · 153, 185, 186, 188, 200, 247, 253, 268,  
     277, 286, 600, 607  
 Vennetier Michel · 636  
 Vennin emmanuelle · 337  
 Ventalon Sandra · 486  
 Ventura Santos Roberto · 54  
 Véquaud Pierre · 68  
 Verati Chrystèle · 167, 505, 669  
 Vérati Chrystèle · 517  
 Verbist Michaël · 144  
 Vercouter Laurent · 519  
 Vergès Jaume · 224  
 Vergnes Jean-Pierre · 671  
 Verhaert Michèle · 58  
 Verheyden Sophie · 622  
 Vérité Jean · 239  
 Verrecchia Eric · 541, 638, 642  
 Verrier Fanny · 269  
 Verron Héloïse · 478, 483  
 Vicelli Joséphine · 557  
 Vidal Muriel · 715  
 Vidal Olivier · 232  
 Vidal Valérie · 129, 130  
 Viennet Jean-Christophe · 327, 484  
 Vigne Christophe · 631  
 Vigne Jean-Denis · 520  
 Vigneron Georges · 684  
 Villard justine · 241  
 Villaros Arnaud · 181  
 Villeneuve Quentin · 31, 569, 570  
 Vincent Benoît · 7

Vincent Peggy · 722  
 Vinches Marc · 21, 22, 23  
 Viret Fanny · 541, 638  
 Virgone Aurélien · 135, 229  
 Virlogeux Denis · 195  
 Virolle Maxime · 89, 142  
 Vitry Clément · 702  
 Vittecoq Benoit · 623, 666  
 Volante Silvia · 172  
 Voltz Baptiste · 69

## W

Wagner Gerlind · 270  
 Waldner Maxime · 208, 216, 242, 430, 473  
 Wang Qingchen · 708  
 Wang Yanbin · 565  
 Warchola Tyler · 335  
 Wary Mélanie · 312  
 Watelet Jean-Marc · 613  
 Waterlot Christophe · 353  
 Watremez Louise · 247, 249, 265, 268, 269, 270  
 Wattellier Florent · 223  
 Wattez Julia · 509, 520, 522, 530  
 Wattier Marie-Laure · 148, 563  
 Wattripont Adrien · 644  
 Watts Anthony · 184  
 Weber Nicolas · 81  
 Wei Wei · 33  
 Weill Pierre · 85  
 Werner Philippe · 248  
 Weschenfelder Jair · 306  
 Wetzel Andreas · 106  
 Winiarski Thierry · 365  
 Witt César · 90, 185, 186, 188, 273, 274, 279, 286, 287,  
     310  
 Wolff Philippe · 26  
 Wolski Piotr · 591  
 Woodhead Jon · 517  
 Wouters Sébastien · 416  
 Wu Chung-Che · 517  
 Wu Yuyin · 344  
 Wuilleumier Arnaud · 230  
 Wygralak Andrew · 325  
 Wyns Robert · 37, 40, 57, 610  
 Wypych Valérie · 685

## X

Xu Man · 565  
 Xu Xiaobing · 708

## Y

Yannick Thiery · 623

Yannis Labeau · 671  
Yans Johan · 27, 38, 58, 416, 448, 450, 694  
Yart Silvain · 632, 633  
Yelles-Chaouche abdelkrim · 618  
Yıldırım Cengiz · 615  
Yu Tony · 565  
Yu Yang · 439  
Yuan Xiaoping · 41, 56

---

**Z**

Zaghoul Mohamed Najib · 206, 225  
Zaher Mohamed Abdel · 192

Zahmoul Raouïa · 90  
Zanoni Davide · 167, 171, 172  
Zaragosi Sébastien · 32, 96, 271, 389, 401, 414  
Závada Prokop · 179, 474  
Zeghouane Hocine · 695  
Zeh Armin · 194  
Zelano isabella · 358  
Zerdeb Amine · 206  
Zhao Liang · 708  
Zhao Luanxiao · 569  
Zheng Tianyu · 708  
Zhu Rixiang · 708  
Zielinski Jean · 442  
Zigaite-Moro Zivile · 301  
Zucali Michele · 171, 172

**Il a été imprimé par**  
L'Université de Lille  
Service de Reprographie  
59955 Villeneuve d'Ascq Cedex

ISSN : 978-2-85363-103-7  
Dépôt légal : octobre 2018

