



Société
Géologique
de France



RÉUNION DES
SCIENCES DE LA TERRE

01 au 05 novembre 2021

Centre de Congrès | LYON

www.rst-sgf.fr



Livre des résumés Abstracts

Co-organisé avec



Soutiens





Comité d'Organisation

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

Co-présidents

François Baudin (*Président de la SGF*)
Emanuela Mattioli (**LGL-TPE**)

Membres de droit

Pascal Allemand (*co-Président du Comité scientifique*)
Jamyl Brahami (*Trésorier de la SGF*)
Nicolas Lemonnier (*Président de la section Jeunes de la SGF*)

Membres délégués

Isabelle Daniel (*Directrice de OSUL, LGL-TPE*)
Eric Marcoux (*Vice-président aux affaires professionnelles de la SGF*)
Véronique Gardien (*LGL-TPE*)
Charles Cartannaz (*BRGM*)
Jérémy Gaillot (*TOTAL*)
Frédéric Thoué (*Lafarge Holcim*)
Didier Nectoux (*Président de la Section Géole de la SGF*)
Clément Cazé (*Chargé de projet Beaujolais UNESCO Global Geopark*), *Forum géoparc, médiation et géotourisme*

Suivi opérationnel et logistique

Solange Chaimbault (*Directrice de la SGF*)
Sébastien Garnaud (*Responsable communication de la SGF*)
Meriem Cherifi (*Assistante communication et événementiel*)

Délégués locaux

Sylvie Chabrol (*Forum Enseigner les Géosciences, Inspectrice d'académie SVT, Lyon*)
Olivier Dequincey (*Forum Enseigner les Géosciences, Planet-Terre, ENS de Lyon - DGESCO*)
Gweltaz Mahéo (*Forum Enseigner les Géosciences, LGL-TPE*)
Marianne Métois (*logistique étudiants, LGL-TPE*)
Vincent Perrier (*logistique étudiants, LGL-TPE*)
Pierre Thomas (*terrain, LGL-TPE*)
Emmanuel Robert (*responsable Collections de Géologie de Lyon, LGL-TPE*)
Guillaume Suan (*LGL-TPE*) *organisation workshop*
Toarcien IGCP-655
Anne-Magali Seydoux-Guillaume (*LGL-TPE*) *relations avec SF et SFMC*

Comité Scientifique

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

Co-Présidents

Pascal Allemand (*LGL-TPE*)
Emanuela Mattioli (*LGL-TPE*)

Membres délégués

Jérémy Melleton (*Vice-président de la SGF*)
Laurent Jolivet (*Rédacteur en chef du BSGF-Earth Sciences Bulletin*)
Cécile Robin (*Responsable RST Rennes 2023*)

Délégués par spécialités

Damien Guillaume (*LMV StEtienne*)
Thierry Alboussière ou Bernard Bourdon (*Terre et Planètes, LGL-TPE*)
Romain Amiot (*Paléontologie, Paléoenvironnements, Paléoclimats, LGL-TPE*)
Laurence Lemelle (*Biosignatures et Vie Primitive, LGL-TPE*)
Jean-Emmanuel Martelat (*LGL-TPE*)
Philippe Hervé Leloup (*LGL-TPE*)

Vincent Balter (*Interdisciplinarité, LGL-TPE*)
Adélie Delacour (*Interaction fluides-roches, LMV StEtienne*)
Amélie Quiquerez (*ARTEHIS, Dijon*)
Jean-François Ghienne (*EOST, Strasbourg*)
Bruno Galbrun (*Institut des Sciences de la Terre, Paris*), *Président Section Strati de la SGF*
Bruno Lanson (*ISTerre minéralogie, synchrotron*)

Délégués internationaux

Matias Reolid (*Université de Jaén, Espagne*), *organisation workshop Toarcien IGCP-655*
Alicia Fantasia (*Université de Lyon 1*), *organisation workshop Toarcien IGCP-655*
Daniel Ariztegui (*Université de Genève, Suisse*)
Maria Iole Spalla (*Université de Milan, Italie*)
Kamal Tajeddine (*Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc*)
Nadine Mattielli (*Université Libre de Bruxelles, Belgique*)



Table des sessions

T1.1 Etudes crustales	6
T1.2 Orogènes : Système Tibet-Himalaya, Chaînes Alpines péri-méditerranéennes et Pyrénées.....	9
T1.3 Paléoreliefs et paléoaltitudes.....	47
T1.4 Volcanologie : Imagerie muon, sismologie ; dynamisme éruptif	60
T1.5 Pluton emplacement vs tectonic setting	75
T1.6 Dynamique des bassins compressifs	85
T1.7 Géodésie et Géophysique	104
T1.8 Pétrologie et chronologie métamorphique	114
T1.9 Numerical modelling along active plate margins at different scales.....	134
T1.10 Processus de rifting et formation des marges passives : géodynamique, cinématique, tectonique, stratigraphie et géomorphologie	141
T1.12 Understanding subduction interface dynamics : where do we stand ?.....	171
T1.13 Bassins sédimentaires : les avancées de la modélisation numérique, de l'échelle lithosphérique à l'échelle de réservoir	203
T1.14 Les marqueurs de migrations de fluides sur les marges continentales : processus physico-biochimique	209
T1.15 Tectonique, Topographie et Climat et leurs impacts sur les paléo-environnements et la biodiversité.....	221
T1.16 Géosciences marines	241
T1.17 Différentiation de la lithosphère.....	252
T2.1. Approche interdisciplinaire du manteau	257
T2.2. Approche interdisciplinaire du noyau	266
T3.1. Terre primitive.....	270
T3.2/3 Géodynamiques précambriennes et premières évidences de tectonique des plaques	281
T4.1. Géosciences des régions polaires et subpolaires	285



T5.2 Minéralogie et transition énergétique / Métaux de la transition énergétique.....	297
T5.3 Histoire des sciences de la Terre	309
T5.3.1 Aléas et risques naturels.....	312
T5.3.2 Activités anthropiques et contaminations environnementales	323
T5.3.3 Risques littoraux.....	343
T5.3.4 Glissement de terrain.....	350
T5.4 Tectonique active : la sismicité de la France et le séisme de Teil	357
T5.5 Bassins et ressources pour le XXI siècle	374
T5.6 Changement climatique récent : observations et impacts	392
T5.7 H2 natif.....	396
T6.2. Archéométrie, archéologie	405
T6.3. Géarchéologie	429
T6.4. Origine de la Vie et implications exobiologiques	450
T7.3. Géologie lunaire et martienne	456
T7.4. Impacts	464
T8.1. Les sédiments littoraux et sublittoraux : sources, stocks, transport et morphologies de dépôt.....	473
T8.2. Archives océaniques actuelles et subactuelles	491
T9.1. Processus élémentaires géomorphologiques (transport de sédiment, érosion des versants/rivières, incision du lit rocheux, glissements de terrain) – Démarche “Source-to-Sink” (S2S) et formation des surfaces d’aplanissement d’échelle continentale.....	496
T10.1. Big Data en Sciences de la Terre.....	509
T10.2. Outils isotopiques, développements et applications	516
T10.3. Cartographie géologique et thématique innovantes : cartes, bases de données et diffusion des données	528
T10.4. Minéralogie terrestre et extraterrestre : apport de la nano-échelle	547



T10.5. Télédétection pour les géosciences.....	558
T10.6. Matière organique dans les milieux sédimentaires actuels et passés.....	561
T11.1. IWTOAE IGCP-655 Evènement anoxique du Toarcien (Workshop)	574
T11.2. Archives climatiques quaternaires et événements abrupts	590
T11.3. Changements paléoenvironnementaux et paléoclimatiques au cours du Phanérozoïque	603
T11.4. Archives continentales pré-Quaternaire : Paléoclimats, Paléoenvironnement.....	631
T11.7 Perspectives en géologie des carbonates	639
T11.8 Sédimentologie des silicoclastiques	652
T11.9 Processus diagénétiques	660
T11.10 La crise du Messinien : modalités et conséquences	664
T11.11 Cartographier les couplages entre la déformation de la lithosphère et les processus de surfaces : intégrer le contexte géodynamique à la paléo-géographie	683
T13.1 Plate motion and biosphere emotions : the micropaleontological record	692
T13.2 Mammifères cénozoïques, climat et biogéographie.....	704
T13.3 Evolution de la vie au cours de la transition Précambrien-Paléozoïque : biodiversifications et facteurs environnementaux.....	717
T13.4 Gisements et Lagerstätten français – inventaire de la paléobiodiversité.....	724
T13.5 Imagerie appliquée à la paléontologie	732
T13.6 Biodiversité des écosystèmes continentaux et marins au Mésozoïque	744
T14.1 Stratigraphie intégrée – Temps géologique – Calibration astronomique.....	751
T14.2 Temps géologique – Ages radiochronologiques.....	760
T15.1 Fluides juvéniles hydrothermaux dans la croûte continentale et leurs rôles dans les dépôts de minerais.....	767
T15.2 Interaction between deformation and reaction mechanisms throughout the lithosphere	771
T16.1 Objets, données et images des collections, patrimoine scientifique ex-situ	776
T16.3 Les outils de la protection, de la vulgarisation et du géotourisme.....	792



T17.1 Hydrogéologie.....	808
T17.2 Zone critique, érosion et transfert sédimentaire.....	820
T17.3 Sols, devenir des éléments dans la zone critique : cycle bio-géochimique des éléments, bio-géochimie et physico-chimie des interfaces, altérations, géophysique de sub-surface.....	824
T18.1 INSU TS : restitution des grandes orientations scientifiques qui auront été pointées par la section 18 et la CS TS.....	828
T18.2 INSU TS : groupe de travail sur les archives.....	828
T18.4 RGF (Chantier Alpes et bassins périphériques) (BRGM) et Alpararray (INSU)	831
T18.6 Chantier RGF – Cénozoïque (Tertiaire et Quaternaire) du Bassin parisien : avancées récentes, état des lieux des données, questions scientifiques, nouvelles pistes de recherche, applications et perspectives.....	851
T18.8 PIGC	868
Index par auteurs	836



T1.1 Etudes crustales



Lithospheric structure below the currently active Mayotte volcanic area from joint inversion of receiver function and surface wave dispersion data

Anthony Dofal^{*1,2}, Laurent Michon¹ Fabrice R. Fontaine^{2,3}, Guilhem Barruol²,
Elisa Rindraharisaona^{1,2}

(1) Université de La Réunion, Laboratoire GéoSciences Réunion, F-97744 Saint-Denis, France

(2) Université de Paris, Institut de Physique du Globe de Paris, CNRS, F-75005 Paris, France

(3) Observatoire volcanologique et sismologique de la Martinique, Institut de Physique du Globe de Paris - Martinique

The Comoros archipelago is composed of four volcanic islands with contrasting morphologies ranging from a high uneroded relief in the west to a low-lying island surrounded by a broad lagoon around Mayotte islands to the east. This morphological evolution, typical for hot spot volcanoes, along with the increase in the volcanic age from west to east and the isotopic signature of the lavas emitted in Grande Comore were the main arguments for interpreting the volcanism of the Comoros Archipelago as the result of a hot spot. The seismo-volcanic crisis that started in May 2018 east of Mayotte, and the growth of a submarine volcano more than 250 km east from the active Karthala volcanic zone, can hardly be explained within such a hot spot framework. Moreover, this phenomenon was accompanied by several of seismic events located between 5 and 40 km east of Mayotte at a depth of 20 to 45 km below sea level and down to 62 km deep. We performed a joint inversion of receiver functions and surface wave dispersion curves, which allow us to investigate the lithosphere structure under Mayotte. We show that the seismicity occurs in the lithospheric mantle as we constrain a *Moho* depth to 27 km. In addition, our results reveal a slight low velocity zone (LVZ) in the crust that could correspond to an intra-crustal transfer/storage zone of magmatic material, probably not related to the current eruptions since the seismicity swarm do not connect to this LVZ. Within the lithospheric mantle, two LVZs are modeled at 45 and 55 km depth and may correspond to magma storage and/or transfer zones. We found a LAB at around 60 km depth above the main LVZ located below this interface, which is consistent with the proposed magma origin around 60-80 km depth. Thus, these results allow us to hypothesize a magma plumbing model at a lithospheric scale under Mayotte.

Keywords: Mayotte, Lithosphere, Receiver functions, Magmatic plumbing system



Les mécanismes pétrologiques des interactions manteau-croûte dans un pluton tardi-orogénique : le Massif de l'Aigoual, Massif Central.

Mariana Werle¹, Jean-François Moyen^{2,*}, Oscar Laurent³, Gary Stevens¹

1. Stellenbosch University, South Africa.

2. LMV, Université Jean-Monnet & CNRS, Saint-Etienne, France. 3. GET Toulouse, IRD, France.

Le rôle des zones orogéniques dans la croissance crustale est un sujet encore mal compris : ces secteurs sont riches en magmatisme granitique, dont l'origine (fusion de croûte, ou différenciation de magmas mantelliques) et donc la signification (recyclage ou croissance crustale) restent débattus.

De nombreux arguments pétrologiques ou géochimiques permettent d'interpréter le magmatisme granitique Varisque du Massif Central comme le produit d'interactions au Carbonifère entre un composant crustal (anatexie des divers gneiss Protérozoïque à Phanérozoïque), dominant avec un composant mantellique (magmas lamprophyriques, ou vaugnéritiques) mineur. Les processus pétrologiques permettant ces interactions sont cependant mal compris, ce qui rend leur quantification délicate. Le problème est particulièrement compliqué dans les plutons, qui fossilisent une longue évolution incluant des injections de magma(s), le soutirage de liquide résiduels, divers processus de mélange, cristallisation, réactions, etc. Au final, ce que représente un granite n'est pas clair : liquide figé, ou accumulation de cristaux non extraits ? Au cours d'un événement ponctuel, ou d'une succession d'épisodes ?

Le pluton de l'Aigoual, au Sud du Massif Central, offre une fenêtre sur ces processus. Si sa masse principale est formée d'un granite porphyroïde, localement à amphibole ; il est entouré d'un réseau de filons composites avec un cœur de lamprophyre, et une bordure granitique ou microgranitique. Ces filons figent un état ponctuel du système et donnent un instantané de sa dynamique.

Dans les dykes de l'Aigoual, on observe des plagioclases avec des surcroissances basiques ; des globules de carbonates qui pseudomorphosent des phases précoces (olivine ?). Les zircons de ces dykes enregistrent un âge principal de cristallisation proche de 320 Ma, mais aussi une longue préhistoire (de 350 à 320 Ma) et des réouvertures plus tardives. Ces observations peuvent s'interpréter comme témoignant de l'injection de magmas lamprophyriques mantelliques dans la croûte anatectique Varisque, qui déstabilisent le système partiellement fondu et induisent le développement d'un réservoir magmatique duquel différents liquides sont extraits et injectés dans un réseau de fractures où ils forment des dykes composites.



T1.2 Orogènes : Système Tibet-Himalaya, Chaînes Alpines péri-méditerranéennes et Pyrénées



Évolution syn-orogénique du système Pyrénées-Alpes : Etude comparée des bassins d'avant-pays

Angrand Paul^{*1}, Vergés Jaume¹, Ford Mary²

1 : Group of Dynamics of the Lithosphere (GDL), Institute of Earth Sciences Jaume Almera, ICTJA-CSIC, Barcelona, Spain

2 : CRPG-CNRS Université de Lorraine, Vandoeuvre les Nancy, France

Les bassins d'avant-pays sont d'excellents marqueurs de l'évolution orogénique. Couplée à l'étude de l'orogène, leur analyse permet de reconstruire l'évolution dans le temps et dans l'espace du système orogénique complet. Les Pyrénées et les Alpes forment deux segments orogéniques « alpins » déformés au Mésozoïque et au Cénozoïque. Ils inversent des systèmes extensifs ayant atteint l'exhumation du manteau sous-continentale (Pyrénées) et la formation d'un océan (Alpes).

Bien que les phases de déformation et d'exhumation de ces orogènes aient été étudiées par des approches structurales et thermochronologiques, des questions demeurent quant au calendrier de la migration orogénique et son enregistrement sur les cratons, ainsi que la connexion entre ces deux systèmes.

A partir d'une compilation des données sédimentologiques, stratigraphiques et structurales, nous réévaluons l'évolution des bassins d'avant-pays pyrénéens et alpins pour étudier le calendrier de la déformation et son enregistrement à une échelle régionale. La migration des charges orogéniques, caractérisée par la migration des fronts de déformation, est associée à la migration des décentres afin de reconstruire l'évolution de ces systèmes.

Durant la phase de collision continentale, les bassins d'avant-pays pyrénéens et alpins montrent une évolution synchrone le long d'un front de déformation qui relie les deux systèmes de polarité inverse. Entre ces deux domaines, ce front est segmenté par des structures transverses, dont l'importance durant cette phase compressive et lors de l'ouverture de la Méditerranée Occidentale reste à préciser.

L'étude du domaine Languedoc-Provence, qui représente l'articulation entre ces deux segments et sa continuité dans le domaine Corso-Sarde restauré avant l'ouverture du Golfe du Lion, doit maintenant être intégrée pour mieux appréhender la continuité structurale et les mécanismes de transfert de la déformation entre les Pyrénées Orientales et les Alpes Occidentale au Cénozoïque.

Mots-Clés : Pyrénées, Alpes, bassin d'avant-pays, orogène, front orogénique, charge orogénique, foredeep



Évolution syn-orogénique du système Pyrénées-Alpes : Etude comparée des bassins d'avant-pays

Angrand Paul^{*1}, Mouthereau Frédéric¹

¹ : Geosciences Environnement de Toulouse Paul Sabatier, CNRS, IRD, 14 av. Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

Les ceintures orogéniques alpines européennes sont le résultat de l'inversion, initiée au Crétacé de l'Océan Néotéthys occidentale et de la fermeture des reliquats océaniques de la Téthys Alpine entre l'Afrique du Nord et les cratons européens.

Nous examinons les contraintes géologiques et stratigraphiques dans les ceintures orogéniques et les bassins péri-ibériques afin de définir l'histoire de la déformation et la segmentation crustale du domaine européen occidentale. Ces données sont ensuite intégrées avec d'autres contraintes issues de reconstructions cinématiques et paléogéographiques récemment publiées afin de proposer un nouveau modèle tectonique et cinématique régional de l'Europe occidentale depuis la fin du Permien. L'extension pré-collisionnelle entre l'Europe et l'Afrique était distribuée et oblique, construisant ainsi des segments de rift discontinus entre la partie sud de la Téthys Alpine et l'Atlantique Central, caractérisés par une croûte d'extension variable et des domaines océaniques étroits segmentés à travers des structures de transfert et des micro-continent. Les principales structures tectoniques héritées tardi-varisques ont localisé les domaines d'assise et les orogènes. Nous montrons que plusieurs blocs continentaux, y compris le bloc Ebre-Sardaigne-Corse, ont joué un rôle clé dans l'accommodation du décrochement, de l'extension et de la contraction de l'Ibérie et d'Adria. De plus, son existence permet d'affiner la relation tectonique entre l'Ibérie, l'Europe et le domaine nord adriatique dans les futures Alpes. Au Paléogène, la convergence de l'Afrique referme les domaines océaniques répartis spatialement, à l'exception du bassin ionien. La collision implique les différents blocs continentaux, permettant un transfert efficace de la déformation de l'Afrique vers l'Europe. La zone a finalement été affectée par le Rift Ouest Européen, à la fin de l'Eocène, qui a pu influencer l'ouverture de la Méditerranée Occidentale.

Mots-Clés : Limite de plaque diffuse Afrique-Europe ; Reconstructions cinématiques ; Héritage tectonique ; Segmentation crustale ; Ceinture orogénique alpine ; Méditerranée Occidentale



Construction orogénique et processus collisionnels précoces dans les orogènes alpins

Nicolas Bellahsen ^{*} ¹, Jean-Baptiste Girault ¹, Maxime Waldner ¹, Claudio Rosenberg ¹,
Nicolas Loget ¹, Eric Lasseur ²

¹ ISTeP – Sorbonne Université Paris - France

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

Des données récentes, structurales et géochronologiques, notamment dans les Alpes, montrent un écart significatif au modèle classique du prisme frictionnel qui croit par accréation tectonique en séquence. Dans cette contribution, nous synthétisons des données sur l'âge de fonctionnement des zones de cisaillement et failles dans les Alpes et les Pyrénées. Ces données sont couplées aux données de pression, température et exhumation et de quantité de raccourcissements collisionnels. Cette analyse est aussi associée à celle de la dynamique des bassins d'avant pays afin de discuter l'évolution du relief lié à la construction orogénique et les flux sédimentaires associés.

Dans les Alpes externes, les déformations dans la croûte dauphinoise se produisent de 30 à 20 Ma environ (de 18 à 25 Ma selon la latitude) de manière relativement distribuée dans l'espace. Une grande partie de ce raccourcissement se produit au pic de température et probablement pour partie au pic de pression. Puis, à partir de 20 Ma environ, ces déformations se localisent sur les rampes frontales et vont exhumer la croûte. Dans la zone axiale des Pyrénées, des déformations distribuées précèdent l'activation significative des grands accidents crustaux : de l'initiation de la collision vers 70 Ma et jusqu'à environ 40 Ma, la déformation est relativement diffuse dans la croûte, même si des chevauchements s'activent. A partir de 40 Ma, les chevauchements majeurs s'initient et l'exhumation accélère, de manière localisée dans l'espace cependant. Dans les deux cas, Alpes et Pyrénées, l'accélération de l'exhumation dans le prisme collisionnel est marqué dans le bassin molassique par des changements en termes de subsidence et de séquence de remplissage. Ces interactions seront donc discutées.

Nous montrons ainsi qu'une phase de déformation distribuée précoce est significative dans les orogènes étudiés. Cette phase se caractérise par des raccourcissements de l'ordre de 10 à 20 km qui ont lieu pendant des temps caractéristiques de l'ordre de 10 à 30 Myrs. Ces nouvelles données quantitatives portent très probablement un signal rhéologique et/ou d'héritage (structural et ou thermique).

Mots-Clés : Collision, Alpes, Pyrénées, thermochronologie, géochronologie, bassin, rhéologie, héritage



Thermal event of Upper Triassic age revealed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating on the Upper Sebtides metamorphic units (Internal Rif, Morocco): consequence on the timing and the model of the Beni Bousera peridotites emplacement

Asmae El Bakili^{1-2*}, Michel Corsini¹, Jean-Marc Lardeaux¹⁻³, Philippe Munch⁴, Sylvain Gallet¹, Ahmed Chalouan²

¹ Université Côte d'Azur, CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur, IRD, Géoazur, 250 rue Albert Einstein, SophiaAntipolis 06560 Valbonne, France.

² Earth Sci. Dept, Faculty of Sciences, Mohamed V University, BP 1014, Rabat-Agdal.

³ Czech Geological Survey, Centre for Lithospheric Research, Klárov 3, 118 21 Prague 1, Czech Republic.

⁴ Université Montpellier 2, Géosciences Montpellier, UMR 5243, CC 060, place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5, France.

In the Gibraltar Arc located at the western tip of the western Mediterranean, two large massifs of peridotite associated with crustal metamorphic units outcrop in the Ronda massif (Betic Cordillera, southern Spain) and in the Beni Bousera massif (Rif Belt, northern Morocco). The timing and the emplacement process of these peridotite bodies into the crust are still highly discussed.

Our study focuses on the Upper Sebtides metamorphic units (Federico units, Internal Rif), labelled Souk-el-Had units, located west of the Beni Bousera massif. They consist of a tectonic units stack with the repetition of the same lithostratigraphic sequence composed of Permo-Triassic metasediments overlaying Paleozoic basement. In this area, the Upper Sebtides units display a fan-structure pinched between the Dorsale Calcaire unit to the west and the Filali unit (Lower Sebtides) to the east.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating performed on muscovite and biotite on the Paleozoic micaschists that form the basement of Permo-Triassic metasediments (Boured and Beni Mezala units) provides two groups of ages (1) at around 25 Ma and 21 Ma and (2) at around 206 Ma and 219 Ma.

At the thin-section scale, two generations of muscovite are identified in the analyzed samples. Syn-S2 muscovite and biotite underline the main foliation. The syn-S2 assemblage is quartz + plagioclase + biotite + white mica + ilmenite $\pm$ chlorite. Ante-S2 muscovite occurs as large porphyroclast with undulose extinction, partially recrystallized. The ante-S2 assemblage is quartz + plagioclase + biotite + white mica + garnet + sphene.

The Upper Triassic ages obtained on ante-S2 muscovites are interpreted as resulting of a thermal event related to HT-metamorphism that affects a thinned continental crust. Thus, we propose a model of continental margin expansion in relation with exhumation of the mantle during the opening of the Tethysian ocean in a context of hyper-extension.

Mots-Clés : Western Mediterranean, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, Rif belt, Upper Sebtides, hyper-extension



Oman belt: In search of the Tethyan rifted margin and its role for orogenesis

Maxime Ducoux^{*(1)}, Emmanuel Masini⁽¹⁾, and Sylvain Calassou⁽²⁾

¹M&U SASU, Saint-Egrève, France

²Total SE, CSTJF, Avenue Larribau, 64000 Pau, France

Collisional orogen results from the superimposition of different geodynamic stages during convergence. As a consequence, the geological record of pre-collisional convergence stages (e.g. early orogenesis, subduction) as well as the pre-convergence template is heavily overprinted and cannot be easily investigated. To reach initial stages of orogenesis linked to the shortening of rifted margins, we investigate the Oman belt that failed to reach a mature continental collision. This obduction belt is known to results from the Late Cretaceous shortening of a Permian-Triassic Tethyan rifted margin. As such, this belt may have preserved its early orogenic and rift record, but the link between the margin structure with orogenic processes is poorly documented so far. The rift-related record is today exposed along the eastern Oman belt. As it escaped from pervasive orogenic deformation, pre- orogenic relationships between the Neo-Proterozoic basement and rift basins can be described along the Ja'Alan massif in the field. In the SW, the massif represents the former proximal margin as the eroded basement is sealed by post-rift to syn-orogenic shallow marine facies. By contrast, the NE side of the massif is flanked by deep basin syn- to post-rift facies. These two domains are limited by a major N110-oriented thick-skinned normal fault with dip-slip kinematic indicators (sliken slides, S/Cs). The fault zone is made of cataclasites and gouges overlain by base-of-slope polymictic breccias. These latter rework the neighboring basement lithologies and are affected by extensional deformation. Ontop of it, younger successions are onlapping and sealing the normal fault. The late Cenozoic shortening consists in the tightening of this inherited slope. From this geological record, we interpret this area as the former Arabian necking zone that was limiting the propagation of shortening. It is noteworthy that this structure is the lateral continuation of the frontal thrust system. This indicates that the former architecture of the rifted margin may have been a significant driver for obduction orogenesis.

Mots-Clés : Arabian plate, Oman belt, Rift-related structures, Tectonic inversion



Contrôle tectonique des résurgences hydrothermales Pyrénéennes : implications géothermiques

Adrien Eude ^{*1}, Roger Soliva ², Yohan Poprawski ^{3, 4}, Alycia Frochot ¹, Simon Lacombe¹
et Mattis Grenier ¹

¹ Laboratoire de Géologie de Lyon - Terre Planètes Environnement (LGLTPE) – CNRS: UMR 5276, Ecole Normale Supérieure de Lyon – France

² Laboratoire Géosciences Montpellier – CNRS: UMR 5243, Université de Montpellier – France

³ Laboratoire Planétologie et Géodynamique, site angevin (étude des Bio-Indicateurs Actuels et Fossiles) – CNRS: UMR 6112, Université d'Angers – France

⁴ Geologic-Diffusion, 44 rue Béranger, 33100 Bordeaux – France

Les résurgences hydrothermales (définies ici pour des températures dépassant les 15°C en surface) sont nombreuses dans les Pyrénées, elles témoignent de circulations d'eaux chauffées en profondeur. Dans les chaînes de montagnes et leurs bassins d'avant-pays adjacents, le moteur des cellules de convections hydrothermales est une combinaison de convection forcée (potentiel gravitaire induit par la différence d'altitude entre la zone de recharge d'eaux météoriques et l'exutoire de la cellule) et de convection libre (effet thermodynamique, abaissement de la densité de l'eau par chauffage géothermique). Outre la perméabilité primaire des formations sédimentaires, les circulations sont guidées par la perméabilité secondaire induite par les mouvements le long des failles et des fractures associées. Les failles peuvent jouer le rôle de drain pour les fluides au sein de leur zone d'endommagement et potentiellement au sein du cœur de faille en fonction de leur constitution mais aussi de l'activité de la zone de faille. Enfin, le contexte géodynamique conditionne les flux de chaleurs profonds et sont à considérer dans le potentiel de génération des anomalies thermiques des zones de failles. Ainsi, les accidents tectoniques en domaine continental constituent potentiellement des gisements "aveugles" (i.e. sans résurgence), d'intérêt géothermique électrogène, et les processus qui contrôlent leurs anomalies thermiques sont multiples et leurs couplages restent encore mal connus.

Dans le but de mieux caractériser le circuit de ces eaux, de comprendre les paramètres qui contrôlent les écoulements, de hiérarchiser les réseaux de failles qui permettent ces circulations et enfin de contribuer à l'évaluation d'un potentiel géothermique associé à des failles au sein d'une chaîne, une étude couplant l'activité sismique des Pyrénées et la localisation des résurgences a été menée.

Les résultats soulignent une remarquable corrélation entre les zones sismiquement actives et les régions où se concentrent les sources hydrothermales. Cependant, les mécanismes qui lient la présence de résurgences au contexte tectonique des régions sismogéniques sont mal connus. Ce travail de synthèse à l'échelle de la chaîne est complété d'une étude sismique, structurale (terrain et modélisation), géomorphologique et hydrogéologique ciblée sur le bassin d'avant-pays oriental des Pyrénées (Corbières et massif du Mouthoumet). Dans cette région, il apparaît que les résurgences sont majoritairement situées à l'intersection des chevauchements pyrénéens et d'un réseau de failles orientées NE-SW (terminaison du système cévenol ?) relatif à l'ouverture du golfe du Lion.

Mots-Clés : Pyrénées, Aude, Pyrénées-Orientales, Géothermie, résurgences hydrothermales, sources chaudes, sismicité, failles actives, damage zone, core zone



Mise en évidence d'un clivage de dissolution dans le Trias-Lias de la Dorsale calcaire (Rif interne, Maroc Nord) et nouvelles hypothèses sur les socles de ses unités internes et externes dans l'Arc alpin bético-rifain

Abdessamad El Adraoui*, Kawtar Nassri et Tarik Bouramtane

Laboratoire Géosciences, Eau et Environnement, Faculté des Sciences, Rabat, Maroc

L'analyse microtectonique effectuée sur les séries triasico-liasiques des écaïlles de la Dorsale calcaire (Rif interne, Maroc Nord) révèle une importante tectonique de pression-dissolution affectant surtout les unités les plus externes chevauchant le domaine des flyschs et l'Intrarif. Quatre phases de dissolution tectoniques ont été reconnues : Pso-1, Ps2, 3 et 4. La première est une schistosité stylolitique liasique (Sinémurien-Pliensbachien) à fort taux de raccourcissement vertical (25% à 35%) dans les niveaux du Carnien-Norien. Elle est interprétée comme le résultat du rifting téthysien dans la bordure externe de la plate-forme de la plaque d'Alboran. Les autres phases, plus récentes, ont accompagné le cycle orogénique miocène. Notons que la schistosité Pso-1 est absente dans la Dorsale interne caractérisée par un diaclasage pénétratif. Le clivage liasique Pso-1 est exclusif à la Dorsale externe (El Adraoui 2007). Lors de cette phase, dissolution et cristallisation évoluent en sens inverse. La dissolution sous pression est maximale dans les niveaux inférieurs au moment où les précipitations des fluides sont de plus en plus fréquentes vers la surface de la pile triasico-liasique. Sur la transversale dorsaliennne, le clivage de dissolution Pso-1 de la Dorsale externe intervient à la fin du diaclasage des unités internes de la Dorsale dans lesquelles ce clivage n'a pas été observé. Cette évolution semble indiquer un amincissement du bord externe relayant un soulèvement du bord externe de la plateforme dorsaliennne pendant le rifting liasique. Le clivage Pso-1 aurait accompagné d'importants mouvements verticaux aboutissant à l'individualisation de bassins euxiniques profonds recueillant des séries condensées à partir du Jurassique. Par ailleurs, la présence même de ce clivage permet de penser que la Dorsale externe est la couverture décollée d'un socle épi-métamorphique aujourd'hui inconnu. Il pourrait s'agir d'un socle de type Federico supérieures (Sebtides) dont le Trias présente les mêmes faciès carbonaté et clivage stylolitique.

Quant au socle de la Dorsale interne, la plupart des auteurs admettent qu'il est de type ghomaride (Maaté, Porta et Martin-Agarra, 1993), s'appuyant sur la similitude de faciès du Trias et sur le fait qu'aussi bien le socle que la couverture gardent des témoins l'un de l'autre.

Dans la chaîne bético-rifaine, des propositions similaires ont été avancées pour les socles des unités dorsaliennes. Felder (1978), notamment, distingue l'unité externe de Nieves localement épi-métamorphique interprétée comme la couverture décollée des Alpujarrides de Casares équivalents bétiques des Sebtides et l'unité interne de Cabrilla couverture décollée ou non des Malaguides équivalents des Ghomarides.

Si de nouvelles preuves viennent corroborer ces observations, il sera possible d'envisager pour l'orogène bético-rifain, un schéma paléogéographique, au Lias, où le couple Dorsale interne-

Ghomarides (Malaguides) serait d'origine, relativement, plus interne que le couple Dorsale externe-Sebtides (Alpujarrides).

Mots-Clés : Rif interne, Dorsale calcaire, Pression-dissolution, clivage stylolitique.

eladraoui.abdessamad@gmail.com ; nassri.kawtar1993@gmail.com ; tarik.bouram@gmail.com



Structure and petrology of the Edolo diabase and implications for the Alpine tectonics in the Southern Alps, from rifting to continental collision

Marco Filippi^{*1,2}, Gregorio Pulcini¹, Gisella Rebay³, Michel Corsini²,
Jean-Marc Lardeaux^{2,4}, Manuel Roda¹, Maria Iole Spalla¹, Chrystèle
Verati², Davide Zanoni¹

¹ Dipartimento di Scienze della Terra "A. Desio", Università degli Studi di Milano, Via Mangiagalli 34, 20133 Milano, Italy

² UMR Géoazur, Université Côte d'Azur, Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS, IRD, 250 Rue A. Einstein, Sophia-Antipolis 06560 Valbonne, France

³ Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente, Università degli Studi di Pavia, Via Ferrata 1, 27100 Pavia, Italy

⁴ Centre for Lithospheric Research, Czech Geological Survey, Klárov 3, 118 21 Prague 1, Czech Republic - Indiquer seulement votre laboratoire/institution et le Paus

Ti-rich amphibole-, biotite- and clinopyroxene-bearing mafic dykes, historically known as “Edolo diabase”, are widespread in the northern part of the central Southern Alps.

In this area, the dykes crosscut all the Variscan structures affecting the basement rocks in different tectonic units. Alpine folds and thrusts system deeply affects the central Southern Alps, from the syn-subductive to the late-collisional phase. Although this tectonic domain has long been considered devoid of Alpine metamorphism, an Alpine foliation (S₃) is locally developed in the Variscan basement rocks, Permian-Triassic sedimentary sequences, and Edolo diabase dykes. Here, S₃ is supported by upper-greenschist facies mineral assemblages, including Al-rich actinolite, biotite, and epidote. Preliminary P-T estimates (T = 420 – 450°C and P = 0.15 – 0.40 GPa) suggest a barrovian metamorphic imprint related to the Alpine collision.

In this contribution, we present structural, microstructural, mineral-chemical, and geochemical data aimed at (1) describing the Edolo diabase in the framework of the Permian- Triassic magmatism in the Alps, (2) speculating on the tectonic setting accountable for this magmatic event and on the composition of the source mantle rocks at the end and after the Variscan cycle, and (3) constraining the Alpine metamorphic evolution of the northern part of the central Southern Alps.

Mots-Clés : central Southern Alps, Triassic rifting, lamprophyre dykes, Alpine collision, greenschist facies metamorphism



Exhumation du prisme collisionnel ouest-alpin et évolution du bassin molassique

Jean-Baptiste Girault ^{*1}, Nicolas Bellahsen ¹, Nicolas Loget ¹, Eric Lasseur ²,
Matthias Bernet ³, Raphael Pik ⁴, Claudio Rosenberg ¹, Renaud Couëffé ²

¹ Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTEP) - France

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

³ Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) - France

⁴ Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG) - France

Dans cette étude, nous présentons de nouvelles données sismiques, sédimentaires, structurales et thermochronologiques afin de contraindre l'évolution du prisme collisionnel Ouest Alpin et de son bassin molassique d'avant-pays. Il s'agit plus particulièrement de comprendre le rôle de l'intégration au prisme des massifs cristallins externes (MCE) sur la dynamique d'avant chaîne, à travers la cinématique de la déformation et l'exhumation jusqu'à l'évolution du routage sédimentaire et le remplissage des bassins.

Notre zone d'étude s'étend depuis les massifs cristallins externes Belledune - Oisans à l'est jusqu'au bassin Savoie - Genève à l'ouest. A ce niveau, le bassin molassique ouest alpin apparaît étroit et peu développé à la différence de son équivalent Nord (Suisse – Autriche), disparité vraisemblablement liée à l'évolution structurale du prisme collisionnel.

Notre approche multidisciplinaire combine des études thermochronologiques multi-chronométriques in-situ et détritiques, des analyses structurales, ainsi que des analyses sédimentaires, petro-détritiques et, sismiques. Le but ici est notamment de contraindre le plus précisément possible les phases de construction, d'exhumation et d'érosion du prisme externe Ouest Alpin

Nos résultats montrent une dynamique d'exhumation similaire et assez rapide vers 18 Ma pour tous les MCE. Les MCE sud (Oisans, Belledune et Grandes Rousses) montrent cependant une dynamique plus précoce et lente entre 27 et 18 Ma non présente dans les MCE plus au nord (ou mal documentée). Ceci suggère une exhumation diachrone le long de l'Arc Alpin que nous interprétons par une localisation progressive des déformations le long des rampes crustales entre ~25 et 18 Ma. Dans le bassin molassique, nous montrons que les chevauchements se développent en séquence avec les premières déformations au Chattien au niveau du Front Subalpin qui migrent vers l'Ouest au niveau du Gros Foug à partir du Burdigalien. Nos calculs de bilans sédimentaires indiquent une augmentation du flux sédimentaire au Chattien en lien avec l'exhumation de la Zone Interne. A partir du Burdigalien, les bilans sédimentaires diminuent ce que nous interprétons par une réorganisation du réseau de drainage et des changements de subsidence dans le bassin molassique perturbant la dynamique du prisme collisionnel en lien avec l'exhumation des MCE.

Mots-Clés : Alpes, Massifs Cristallins Externes, Bassin molassique, Thermochronologie in-situ et détritique, Interprétations sismiques, Bilan sédimentaire





Unravelling granulitic conditions in Early Triassic crustal xenoliths from NE-Qiangtang, Tibet.

Fanny Goussin ^{1,*} - Carole Cordier ¹ - Émilien Oliot ² - Stéphane Guillot ¹ - Marc Poujol ³ - Anne Replumaz ¹ - Guillaume Dupont-Nivet ³

¹ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, ISTerre, 38000 Grenoble, France

² Géosciences Montpellier, Univ. Montpellier, CNRS, 34000 Montpellier, France
³ Géosciences Rennes, Univ. Rennes, CNRS, 35000 Rennes, France

Unlike most "wedge" orogens, the structure and the composition of the Tibetan Plateau lower crust has kept being largely inaccessible otherwise than by geophysical studies and by the few scattered sampling of xenoliths brought to the surface by volcanism. In the Nangqian basin (NE-Qiangtang terrane), Eocene syn-contractional potassic lavas carry partially molten foliated quartzo-feldspathic xenoliths. Zircon LA-ICPMS U-Pb dating of these crustal xenoliths yields a Lower Triassic age of ca. 248.5 Ma, which is interpreted as the protolith crystallization age, with no evidence for any metamorphic zircon growth or resetting. The rare relict ferro-magnesian minerals found (clinopyroxene, amphibole, phlogopite, garnet) are in textural and chemical disequilibrium, making conventional thermobarometry methods inoperable. Nevertheless, the xenoliths have retained unusual metamorphic features which can help unravelling their pre-entrapment metamorphic history. Pure anorthite "patches" with magnetite inclusions are interpreted as pseudomorphs after garnet. Since these patches are often found in contact with clinopyroxene and rutile, these minerals may together represent a former high-pressure assemblage that developed at 1.2-1.5 GPa and 620-730°C. Such pressure record would indicate that 80% of the present-day crustal thickness of the Tibetan Plateau was already acquired in Eocene times. Moreover, corundum-bearing assemblages, interpreted as pseudomorphs after phlogopite, are best explained by kinetic disequilibrium under high-temperature granulitic conditions, suggesting a short-lived metamorphic event. Taken together, this set of new petrological and geochronological data suggests that crustal granulitic metamorphism may not be related to the onset of a general warming of the Tibetan crust sustained until the present, but rather to the punctual injection of mantle-derived melts in the crust before Eocene eruption.

Mots-Clés : Tibetan Plateau, crustal xenolith, corundum, pseudomorph, granulite, LA-ICPMS U-Pb zircon



Apports du couplage de données géochimiques, tectoniques et sédimentologiques dans la caractérisation de l'halocinèse: exemples des Baronnies, chaînes subalpines méridionales

Catherine Homberg^{*1}, Damien Huyghe², Alain Rabaute¹, Laurence Le Callonnec¹,
LauraSoueidan¹, Djamil Lompo¹, Guillaume Lefebvre¹, Ombeline Alix¹.

¹ ISTE-P, Sorbonne Université

². Centre de Géosciences, MINES ParisTech

Les phénomènes d'halocinèse précédant la compression jouent un rôle majeur dans la déformation interne des prismes orogéniques. Les structures salifères sont communes dans les paléomarges passives aujourd'hui incorporées dans les chaînes de montagne et restent cependant difficiles à appréhender, tant dans leur identification que dans la compréhension des mécanismes sous-jacents. En effet, les études basées sur la géométrie de ces systèmes sont souvent limitées par la déformation ultérieure des diapirs et séquences halocinétiques. Ceci limite fortement notre compréhension des interactions entre diapirisme, processus tectoniques et sédimentaires et conduit à une connaissance partielle des phénomènes d'halocinèse dans les marges inversées comme la marge de la Téthys alpine. Afin de palier à cela, nous proposons une approche de l'étude de ces phénomènes qui intègre des données quantitatives géochimiques aux observations de tectonique et sédimentologie. Cette approche est appliquée au secteur des Baronnies du prisme alpin, correspondant au bassin mésozoïque vocontien, sous-bassin du Bassin du Sud-Est. Dans ce secteur, les diapirs de Propiac- Montaulieu-Condorcet, Suzette et Laragne témoignent d'une activité méso-cénozoïque et plusieurs auteurs ont suggéré que cette activité ait pu impliquer d'autres secteurs que ceux des actuels pointements de Trias. Nous présentons dans cette étude des données de contenu strontium (Sr) mesurées dans les sédiments mésozoïques des Baronnies. Les teneurs obtenues sur roche totale et sur fraction carbonatée révèlent plusieurs anomalies majeures qui témoignent d'une contamination des sédiments par des flux de matériel à nature saline au cours du Crétacé inférieur. Les variations spatiales et temporelles de ces valeurs sont comparées aux variations locales d'épaisseur des séries, aux événements de remobilisation sédimentaires, aux paléocontraintes et au paléo-bati structural. Cette étude soutient une relation étroite entre la tectonique distensive du Crétacé inférieur et l'activité halocinétique au sein du bassin vocontien. Nous discutons ensuite du rôle des corps salifères et des failles normales dans l'inversion de la marge dans le secteur Diois-Baronnies des chaînes subalpines.

Mots-Clés : Halocinèse, diapirisme, Chaînes subalpines, Bassin du Sud-Est, Crétacé



Evolution tectono-sédimentaire de la molasse Miocène du bassin d'avant-pays des Alpes occidentales (Massifs subalpins, Jura méridional, Bas-Dauphiné, la Bresse)

Kalifi Amir^{1, 2}, Sorrel Philippe¹, Leloup Philippe-Hervé¹, Spina Vincenzo², Huet Bastien², Galy Albert³, Demory François⁴, Rubino Jean-Loup², Pittet Bernard¹

¹ Univ Lyon, Univ Lyon1, ENSL, CNRS, LGL-TPE, 69622 Villeurbanne, France.

² Total CSTJF, ISS, Avenue Larribeau, 64000 Pau, France.

³ CRPG, 15 rue Notre Dames des Pauvres, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France.

⁴ CEREGE, Technopôle de l'Arbois-Méditerranée, BP80, 13545 Aix-en-Provence

Bien qu'étudiée depuis plus d'un siècle, l'évolution de la cinématique et de la chronologie de la déformation des zones externes de la chaîne alpine fait encore débat (e.g. ; Leloup *et al.*, 2005; Dumont *et al.*, 2008; Bellahsen *et al.*, 2012, 2014). Cette étude propose d'apporter de nouvelles réponses à travers l'étude des dépôts syn-orogéniques du bassin d'avant-pays des Alpes occidentales. En effet, le Miocène des massifs subalpins septentrionaux, du Jura méridional, du Bas-Dauphiné et de la Bresse, a récemment fait l'objet d'une nouvelle étude multidisciplinaire ayant pour objectif la mise en place d'un calendrier tectono-stratigraphique robuste à l'échelle du bassin. C'est à la lumière de la stratigraphie séquentielle appliquée à des données de terrains et des données de puits, de 134 âges ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, combinées à des datations magnétostratigraphiques et biostratigraphiques, qu'un découpage séquentiel précis (11 séquences de dépôts datées à +/-0.5 Ma en moyenne) est proposé en cohérence avec la stratigraphie du Miocène des bassins voisins (bassin molassique Rhodano-provençal -BMRP- et bassin molassique Suisse -BMS-). A partir de critères stratigraphiques et chronostratigraphiques, la zone d'étude a été subdivisée en 12 zones, elles-mêmes regroupées en 4 domaines de dépôt : **(i)** le domaine interne, où les séquences de dépôts S1 à S3 sont présentes (~21.3 à 15Ma), **(ii)** le domaine médian, avec les séquences de dépôts S2a à S5 (~17.8 à 14Ma), **(iii)** le domaine externe, avec les séquences S2a à S8 (~17.8 à 8-7Ma), **(iv)** et le cas particulier du domaine « bressan » avec les séquences S6 à S8 (~11.55 à 8-7Ma).

Pour inscrire cette distribution spatio-temporelle des dépôts dans un contexte tectonique, une étude structurale (terrain, sous-sol) combinée à une synthèse bibliographique a permis d'identifier cinq Zones de Failles majeures (ZF). Une corrélation a pu être démontrée entre les domaines de dépôt (i), (ii) et (iii) et les ZF1, ZF2 et ZF3, indiquant ainsi une forte interaction entre la déformation et la distribution spatiale des dépôts. Les évidences de dépôts syn-tectoniques et de la migration du dépo-centre ont notamment permis d'identifier une phase compressive W-WNW/E-ESE impliquant le chevauchement basal du massif de Belledonne qui se propage en surface à travers les ZF2 à ZF5. Cette phase débute à 18 +/- 0.5 Ma et se prolonge au minimum jusqu'à 12 Ma. En surface, le front de déformation se propage rapidement d'Est en Ouest, et il faut entre 4 et 6 Ma pour que les ZF2 à ZF5 s'activent les unes après les autres.

Mots clés : Miocène, bassin d'avant-pays, Alpes occidentales, stratigraphie séquentielle, sédimentation syn-tectonique, évolution paléogéographique, âges Strontium.



The role of rift inheritance in building collisional orogens

Gianreto Manatschal¹, Rodolphe Lescoutre¹, Patricia Cadenas¹, Jordi Miro¹, Pauline Chenin¹ and the OROGEN-team

¹ Institut de Physique du Globe de Strasbourg - Université de Strasbourg/CNRS, France

A long-standing problem in geodynamics and in modelling is to evaluate the role of initial conditions, also referred to as the “inheritance”. Inheritance can be defined as the difference between an ideal “layer-cake” lithosphere and a real lithosphere containing heterogeneities of structural, compositional or thermal origins. The reactivation of rifted margins during continental collision and the reactivation of orogenic structures during rifting reflect the interplay between inheritance (innate/“genetic code”) and physical processes at play (acquired/external factors). While physical processes can be modelled with some confidence using numerical codes, assessing the role of inheritance requires to define the initial conditions, which depend on the history of a geological system that is often little constrained.

The aim of the presentation is to provide a conceptual framework about how to integrate rift inheritance in the description of orogenic systems and how to explore its control on the initiation of subduction and subsequent collision. The presentation will focus on one of the best studied and imaged tectonic system worldwide, which is the Biscay-Pyrenean system. This system results from a complex multistage and polyphase rift evolution that shows a differential intensity of reactivation along-strike. This example enables also to compare, from west to east, the reactivation from a mature rifted margin to an immature hyperextended rift system, and to describe the role of exhumed mantle, necking zones and salt from early subduction stages to the onset of collision and to the final formation of a fold and thrust belt.

The presentation will focus on two main points: 1) the definition and description of different rift templates at onset of convergence, and 2) the characterization of the bulk rheology and distribution of the main potential decoupling levels that can be reactivated during convergence. The present-day architecture of the Biscay-Pyrenean system suggests a complex mode, timing and distribution of the deformation during reactivation with a complex partitioning between thick- and thin-skinned deformation, the former controlled by the presence of exhumed mantle and necked crust, the latter by the presence of salt. Thus, the “genetic code” of a geological system (e.g. inheritance) may evolve during reactivation and may be scale-dependent. Once strain becomes localized, the orogenic evolution may be mostly controlled by the physical processes and parameters ruling the Coulomb-wedge theory. This may explain why most numerical models create similar final architectures and why inheritance may have been overlooked in the study of mature orogens, best exposed in fold- and thrust belts. The results from the OROGEN project suggest that the role of inheritance may be more important during the initial, yet little understood stages of subduction and collision. Future research using other orogenic systems such as those exposed in the Alps, Columbia, Taiwan, Zagros or Timor will be necessary to test these new concepts that may provide a more realistic understanding of how rift systems and rifted margins are reactivated and evolve into orogens.

Mots-Clés : rift-system, reactivation, inheritance, orogenic systems, Biscay-Pyrenees



Lawsonite et aragonite dans les unités océaniques de la zone du Combin (Alpes occidentales): implications tectoniques

Paola Manzotti¹, Michel Ballèvre^{2*}, Pavel Pitra², Federica Schiavi³

¹ Department of Geological Sciences – Stockholm University – Stockholm – Suède

² Géosciences Rennes - Université de Rennes 1 – Rennes – France

³ Laboratoire Magmas et Volcans - Université Clermont-Auvergne – Clermont-Ferrand – France

Les unités océaniques des Alpes occidentales sont classiquement divisées en deux groupes majeurs. Le premier comprend les unités ayant enregistré un métamorphisme dans le faciès des éclogites à quartz (Voltri, Viso, Zermatt), voire à coesite (Cignana). Le second rassemble les unités où le métamorphisme a atteint les conditions du faciès des schistes bleus (Montenotte, Queyras, Combin). Alors que les paragenèses du faciès des schistes bleus sont souvent bien préservées (et pétrologiquement caractérisées) à Montenotte et dans le Queyras, elles sont fort mal connues dans la zone du Combin. Par exemple, la lawsonite, si abondante à Montenotte et dans le Queyras, était jusqu'à présent inconnue dans la zone du Combin.

Notre propos est justement de présenter notre découverte de calcschistes à lawsonite et plus rarement à grenat, et de micaschistes à grenat-glaucophane dans la zone du Combin, dans des localités se trouvant aussi bien à l'ouest qu'à l'est de la klippe de la Dent-Blanche. Les micaschistes permettent, via une modélisation thermodynamique de la croissance du grenat, d'approcher l'histoire prograde, culminant vers 1.6-1.7 GPa, 460-480°C. Dans les calcschistes, la lawsonite est uniquement observée sous forme de pseudomorphoses, parfois spectaculaires (avec préservation des zonations en secteur). La distribution et l'abondance de la lawsonite sur un affleurement est étroitement liée à la préservation du litage sédimentaire (alternances marno-calcaires). La croissance de la lawsonite requiert par ailleurs une phase fluide ayant une teneur en CO₂ inférieure à 0.005 mole per cent.

Une patiente caractérisation des inclusions en microspectrométrie Raman nous a permis d'identifier en outre des reliques d'aragonite, une deuxième occurrence dans les unités océaniques des Alpes occidentales. Le polymorphe stable du carbonate de calcium dans la schistosité et les veines est cependant, sans surprise, la calcite.

Ces observations permettent de mieux rendre compte de la distribution globale du métamorphisme de haute pression dans les Alpes, en levant certaines contradictions auxquelles l'absence de lawsonite dans la zone du Combin donnait lieu quant à la structure thermique globale de la zone de subduction.

Mots-Clés : lawsonite, aragonite, Combin, Alpes occidentales



Structuration des chaînes de marge active en réponse à la dynamique de la subduction : l'exemple des Andes

Joseph Martinod ^{*1}, Laurent Husson ², Vincent Regard ³ et Nathan Minon ¹

¹ ISTerre - Université Savoie Mont Blanc, Univ. Grenoble Alpes, CNRS, IRD, Le Bourget du Lac, France

² ISTerre - Université Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, Grenoble, France

³ GET - Université de Toulouse, CNRS, UPS(OMP), IRD, CNES, Toulouse, France

Les modèles mécaniques de déformation de la lithosphère montrent que le raccourcissement d'une plaque continentale est généralement accommodé par des prismes d'accrétion crustaux qui croissent au-dessus de méga-chevauchements recoupant le manteau lithosphérique. La formation de la Cordillère des Andes, dans un contexte de marge active, obéit à cette règle. En cela, elle présente de nombreux points communs avec les chaînes de collision continentales.

L'analyse des datations disponibles dans les Andes centrales permet de reconstituer l'évolution de la géométrie de la plaque océanique plongeant sous le continent sud-américain depuis le Crétacé supérieur. On constate que la localisation des méga-chevauchements qui recoupent le manteau est contrôlée par la plaque plongeante. En particulier, des épisodes de subduction horizontale entraînent une migration de la zone de raccourcissement loin de la fosse de subduction, avec apparition d'un second prisme d'accrétion crustal qui se développe à l'intérieur du continent, et dont la croissance entraîne l'élargissement de la chaîne andine. La vergence des méga-chevauchements recoupant le manteau explique la propagation des structures crustales, parfois vers l'Est, parfois vers l'ouest.

Nous montrons que la dynamique de la subduction océanique, très variable d'un secteur à l'autre des Andes, explique le diachronisme de la structuration et de l'élargissement des Andes centrales. Nous concluons que l'aspect contrasté actuel de la morphologie de la Cordillère des Andes est le résultat des interactions entre la plaque plongeante et la tectonique continentale au cours du Tertiaire. L'apparition ou l'absence de segments de subductions horizontales est un mécanisme essentiel qui explique la largeur actuelle de la chaîne, à toutes les latitudes.

Mots-Clés : Andes, subduction, tectonique, magmatisme, prismes d'accrétion



Revisiting the Wilson cycle(s) across the Africa-Iberia-Europe diffuse plate boundary: How much an orogenic lifecycle is predestined?

Emmanuel Masini ^{*1,2}, Sylvain Calassou ³, Isabelle Thinon ⁴, Olivier Vidal ², Gianreto Manatschal ⁵, Sébastien Chevrot ⁶, Mary Ford ⁷, Laurent Jolivet ⁸, Frédéric Mouthereau⁹, The Orogen Project team

¹ M&U sas – France

² ISTerre, Institute of Earth Sciences – France

³ TOTAL R&D, Centre Scientifique et Technique Jean Féger (CSTJF) – France

⁴ BRGM, Orléans – France

⁵ IPGS, University of Strasbourg, Strasbourg – France

⁶ OMP, Toulouse – France

⁷ CRPG, Nancy – France

⁸ ISTEP, Sorbonne Université, Paris – France

⁹ GET, University of Toulouse, Toulouse – France

The OROGEN project (CNRS-BRGM-Total partnership) aimed at better understanding orogenic processes along the Africa-Europe plate boundary across Iberia. One advantage of the project's playground is that different orogenic maturity stages are today exposed ranging from the incipient subduction of the Bay of Biscay to the Gulf of Lion back-arc. A significant outcome of the project is to reveal the control of the pre-orogenic divergent setting on later orogenesis as: 1) the maturity of divergence and 2) the spatial and temporal partitioning/scattering of rifting. First starting diffuse and far-field, convergence is progressively focusing along mature hyper-extended rift domains that gets inverted during the “early orogenesis” (Basque Cantabrian belt/Bay of Biscay OCT and Pyrenees). West of Pyrenees, it can be shown that underneath a basal salt decollement, exhumed mantle and hyper-thinned crustal domains get “consumed” by a forced “proto-subduction” (mega- thrust). In the Pyrenees, this “consumable material” was presumably too narrow to promote a mature subduction before being interrupted by continental collision. An exception to this pattern results from the 3D segmentation of rifts. As shortening linkup different rift axes spatially, convergence shortcuts relay zones. As today imaged by the Maupasacq passive seismic images, it leads to sample the « consumable material» in the orogenic supra- structure. Once the “consumable material” is consumed, a progressive regional stress increase and a diffuse deformation is recorded while necking zones are shortened. It forces convergence to reorganize spatially and implies the inversion of neighbouring less mature rifts before new crustal-scale structures forms beyond the necking zones in the prowedge sidethick continental crust. Then, the orogenic system tends to reach a new equilibrium between tectonic/body forces, accommodated strain and surface processes. Two end-member post- orogenic dynamics are then discussed. A post-orogenic back-arc dynamic starts if there is a remaining “consumable material” for an active and mature subduction (e.g. Gulf of Lion) while a mature collision happens laterally (Alps). The second “collapse” lifepath follows a mature collision (Pyrenees) and is caused by the decrease of tectonic forces that breaks the depth-surface equilibrium. From our results, we propose a new “orogenetic” classification linking orogenic diversity/lifecycles as a function of varying divergence and convergence maturities within different Wilson Cycles.

Mots-Clés : Orogen project, Orogen, Pyrenees, Rifted margin, inversion, collision, far-field , kinematics,



Cenozoic evolution of sediment routing systems in the southwestern Pyrenean foreland

Lionel Menzer ^{*1}, Cédric Bonnel ¹, Guilhem Hoareau¹, Charles Aubourg¹

¹ Laboratoires des Fluides Complexes et leur Réservoirs (LFCR) – Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA), CNRS UMR 5150, TOTAL – France

The southwestern Pyrenean foreland corresponds to the wedge-top Jaca basin separated from the southern Ebro foredeep depocenter by the “Sierras Exteriores” frontal thrust. It has been extensively studied these latter decades as the outcropping sedimentary formations recorded the complete history of a marine then continental foreland basin system (FBS).

The review and crossed analysis of published magnetostratigraphic sections, basin-scale seismic lines together with paleocurrents and sediment provenance datasets results in the : 1) reappraisal of the tecto-sedimentary temporal framework for the whole southwestern Pyrenean foreland and 2) characterization of its paleogeographic and sediment routing evolution through the Pyrenean orogeny.

The Jaca basin were the early foredeep depocenter fed by E-sourced deep marine turbidites varying southward to shallow-marine carbonates during (Ypresian-Lutetian). They are followed-up by a transitionnal, pro-delta marls then deltaic sandstones sequence (Bartonian- Priabonian) that record the progressive uplift of the FBS. The change toward a continental environment is diachronous between the northern margin fed by short-term, N-sourced alluvial fans (ch18) and the southern margin fed by a long-term, E-sourced fluvial system (ch16). The foredeep depocenter migrated southward in the Ebro basin as the Jaca basin were incorporated in the orogenic wedge during Rupelian (ch12). It were fed first by E-sourced fluvial system then replaced by N-sourced alluvial systems since Chattian (ch7).

This long-term evolution of the South-Pyrenean paleogeography and sedimentary routing systems records complex interferences between global (climate & geodynamic) and local (tectonic and sedimentation) control factors and allow us to propose a model for the tectono- stratigraphic evolution of overfilled peripheral foreland basins systems.

Mots-Clés : foreland basin systems, south-western Pyrenees, source-to-sink, Cenozoic, magnetostratigraphy, seismic



Rediscovery of a major alpine thrust : the Helvetic Basal Decollement

Antoine Mercier ^{*1}, Philippe Hervé Leloup ¹, Gabriel Courrioux ², Séverine Caritg ²,
Simon Lopez ², Amir Kalifi ¹

¹ Laboratoire de Géologie de Lyon – Terre, planètes et environnement (LGL-TPE) – CNRS : UMR5276, Université de Lyon - France

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

Since two centuries the European Alps are a natural laboratory to study continental lithosphere deformation during mountain building. Since the early studies a constant question has been to evaluate the importance of vertical versus horizontal displacements in the building of reliefs. Whilst the occurrence of large thrust sheets, as initially proposed from field observations, are now well explained in the frame of plate tectonics, controversies still arise on the precise geometry, amount and timing of major thrusting during the orogeny.

We present a new detailed 3D structural study of the cover / basement relationships in the Chamonix synclinorium in between the Mont-Blanc (MB) and Aiguilles Rouges (AR) ranges, two of the main external basement ranges of the western Alps, that allows to decipher the area structural history : the Mesozoic sedimentary cover has been thrust at least 10km NW above the Helvetic Basal Décollement (HBD) prior to be offset by late steep thrusts during exhumation in the Miocene.

Such interpretation fundamentally diverges from the classical view of the sedimentary cover of the Chamonix synclinorium being expelled from a former graben during a single deformation phase, and implies that a major thrust phase lasting ~10 Ma has been overlooked. Our observations show that the HBD was a major thrust system active between

~30 and ~20 Ma, possibly until 15 Ma, with a shortening of more than 10km in the south to 20km in the north. It extends below most of the subalpine ranges and emerges in front of the Bauges and within the Chartreuse and Vercors massifs, and was rooted east of the External Crystalline Massifs (Mt-Blanc and Belledonne). During the Miocene, the HBD was cut by steep reverse faults and uplifted above the basement culmination of the ECM obscuring its continuity and precluding its recognition as a major structure even if it was previously described at several localities.

Mots-Clés : Structural Geology, Alps, 3D model, thrusting



Et s'il existait une phase de raccourcissement « tardi – pyrénéenne » à la transition Burdigalien - Langhien ... ?

Oriane Parizot^{1*}, Yves Missenard¹, Frederic Haurine¹, Thomas Blaise¹, Jocelyn Barbarand¹, Antonio Benedicto¹, Philippe Sarda¹

¹ Université Paris-Saclay, CNRS, GEOPS, 91405, Orsay, France

Le développement de nouvelles techniques de datation telle que la méthode U-Pb sur calcite de faille au Spectromètre de Masse couplé à un Système d'Ablation Laser (LA-ICP-MS) permet de préciser ou compléter les calendriers géodynamiques au front des orogènes, jusqu'alors établis à l'aide de la thermochronologie et des dépôts syn-tectoniques. Nous présentons ici les résultats surprenants obtenus dans l'avant-pays oriental nord pyrénéen (région des Corbières) et qui permettent de discuter de l'évolution Néogène, supposée post- orogénique, de la chaîne. En plus de confirmer la phase pyrénéenne d'âge Eocène, la datation des calcites syn-tectoniques montre que cette histoire compressive s'est poursuivie au Miocène (c.a. 16Ma) avec la réactivation des grandes structures régionales telles que le Chevauchement Frontal Nord Pyrénéen et le Front Nord Mouthoumet. Ces résultats permettent de jeter un regard nouveau sur des observations connues comme l'existence de surfaces perchées datées du Miocène et présentes dans l'entièreté de la chaîne.

Mots-clés : Corbières, Pyrénées, datation U-Pb, calcite syn-tectonique, déformation miocène



A hidden fold and thrust belt south of the Himalayan morphological front: The examples of Central Nepal and Darjeeling piedmonts

Jean-Louis Mugnier ^{1,2*}, Pascale Huyghe^{3,2}, Etienne Large³, Bertrand Guillier^{4,2}, François Jouanne^{5,2}, and Tapan Chabraborty⁶

¹CNRS – France ; ²Institut des Sciences de la Terre- France ; ³ Université Grenoble Alpes – France ; ⁴ IRD – France ; ⁵ Université Savoie Mont Blanc – France ; ⁶ Geological Studies Unit, Indian Statistical Institute – India.

The morphological boundary between the Himalayas and the foreland plain is well expressed and most often corresponds to the frontal emergence of the Main Himalayan Thrust (MHT). This boundary is thus affected by surface ruptures during very large Himalayan earthquakes ($M_w > 8$) which regularly induce (with a recurrence of the order of 500 to 1200 years) the uplift of the foothills relative to the plain.

However, a thrust fold system is hidden beneath the plain and has been imaged by oil-companies' seismic profiles, in East/Central Nepal or by H/V passive geophysical techniques in Darjeeling. Its long-term kinematic evolution is slow, with a tectonic uplift of the hangingwall lower than the subsidence rate of the foreland basin, i.e., less than ~ half a millimeter by year. During phases of low sedimentation controlled by climatic fluctuations, the morphological surfaces of the piedmont are nonetheless incised by several tens of meters by the large rivers. Thus, structures hidden under the sediments slightly emerge in the plain.

The evolution of the hidden structures corresponds to that of a proto-thrust belt affected by a layer parallel shortening (LPS) acting in the long term with a shortening rate of the order of 1-2 mm/yr, i.e., of 5-10% of the shortening rate of the Himalayan thrust system. Comparison of the long term structural evolution with geodetic, geomorphological and paleoseismological studies suggests several deformation components:

i) an aseismic deformation is associated with the LPS structures; at present, it is not proven that it occurs in a continuous manner and the data are also consistent with a deformation of limited duration – less than 15 years – and a multi-centimeter scale amplitude. The aseismic deformation could absorb the entire deformation of the proto-thrust belt in east-central Nepal. The amplitude of this aseismic deformation is nonetheless too limited to significantly reduce the seismic hazard in the seismic gaps;

ii) in some portions of the Himalayan front, such as the Darjeeling (India), the thrust deformation related to great earthquakes propagates ahead of the morphological front, in the zone previously affected by the LPS and induces multi-meter surface ruptures in the piedmont;

iii) last, pre-existing faults in the bedrock of the Indian craton, often oblique to the Himalayan structures, are locally reactivated beneath the foreland plain with low velocities.

Mots-Clés : Himalayan front, aseismic deformation, blind thrusts, geomorphology, proto-thrust wedge



Direct dating of brittle extensional deformation in the internal zones of the RifChain

Münch Philippe ¹, Caillaud Jacinthe ², Monié Patrick ¹, Grauby Olivier ³, Michel Corsini ⁴, Ricci Julia ¹, Romagny Adrien ⁵, Philippon Melody ⁶, Lanson Bruno ⁷, Azdimousa Ali ⁸, Ben Moussa Abdelkhalak ⁹, Arnaud Nicolas ¹

¹ Géosciences Montpellier, Université de Montpellier-CNRS-Université des Antilles, CC 060, place Eugène Bataillon 34095 Montpellier cedex 5, France
² Univ. Littoral Côte d'Opale, Univ. Lille, CNRS, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, F 62930 Wimereux, France

³ Aix-Marseille Université – UMR 7325 CINaM/CNRS, campus de Luminy, Case 913, 13288 Marseille Cedex 9, France

⁴ Université Côte d'Azur, CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur, IRD, Géoazur, 250, rue Albert Einstein, 06560 Sophia Antipolis, France
⁵ rue du Lavoisier, 06340 Drap, France

⁶ Géosciences Montpellier, UMR 5243, CNRS, Université des Antilles-Université de Montpellier, Campus de Fouillol, 97159 Pointe-à-Pitre, FWI, France

⁷ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, Univ. Gustave Eiffel, ISTerre, F-38000 Grenoble, France

⁸ Faculté Pluridisciplinaire de Nador & Laboratoire des Géosciences Appliquées, Faculté des Sciences, Université Mohammed I, Oujda, Morocco

⁹ Département de Géologie, Université Abdelmalek Essaadi, 93003 Tetuán, Morocco

We provide for the first time a direct dating of brittle deformation of internal zones of the Rif chain, in the Ceuta peninsula. We report two $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ illite ages from fault gouge within the orthogneiss from the Monte Hacho Lower Unit (12.1 ± 2.6 Ma and 15.9 ± 1.9 Ma) in the footwall of the Ceuta Shear Zone and three $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ illite ages from fault gouge within the granulitic paragneisses from the Ceuta Upper Unit (16.0 ± 1.0 Ma, 18.7 ± 0.3 Ma and 18.7 ± 0.3 Ma), in the hanging wall. We also report apatite (U-Th)/He ages in rocks from both units that exhibit slightly different cooling history with the footwall cooled down to 40°C slightly before (c. few million years) the hanging wall of the Ceuta Shear Zone.

We interpret the illite ages to date growth of authigenic illite (1Md polytype) during gouge formation at temperatures lower than 60°C . Such low temperatures correspond to the top few kilometers of the earth's surface and were previously reported for illitization processes during the faulting of sedimentary clay-rich wall rocks.

The studied brittle deformation within the internal zones of the Rif-Betic chain revealed that an E-W directed extension, initiated at the ductile-brittle transition at around 21 Ma, lasted until ~ 16 Ma during the cooling of Sebide-Alpujarride units through the apatite PRZ. After 16 Ma, the direction of extension shifted to NNW-SSE and only minor steep normal faults occurred at depth < 1 km corresponding to temperatures cooler than 40°C . Thus dated brittle normal faults occurred after a phase of rapid cooling and during the initial stage of slow cooling ($\sim 1\text{--}2^\circ\text{C}/\text{myr}$) representing exhumation within the uppermost 1-2 kilometers of the continental crust. These two brittle extensional events match well the subsidence pulses evidenced the neighboring Alboran Basin.

Mots-Clés : Western Mediterranean, Fault gouge dating, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, Low-T thermochronology, Rifbelt



Evolution du bilan érosion-sédimentation pyrénéen de 45 Ma à 0 Ma : implications sur le routage des sédiments

Alexandre Ortiz ^{*1,4}, Charlotte Fillon ⁴, François Guillocheau ², Norman Daril ⁴,
Cécile Robin ², Eric Lasseur ³, Justine Briais ³, Matthew Fox ⁵

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour – France

² Univ. Rennes – France

³ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

⁴ TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Férat (CSTJF) – TOTAL – France

⁵ University College London, UK

Le transfert des sédiments dans un domaine orogénique est contrôlé par les interactions entre les processus géodynamiques et tectoniques, le climat, les conditions de drainage dans les bassins ainsi que les variations de niveaux marins. Les approches de traçage de sources considèrent généralement un temps négligeable d'export des sédiments depuis leur lieu d'érosion jusqu'à leur bassin terminal. Pourtant, l'évolution pluri-phasée d'une orogène et de ses bassins d'avant-pays laissent présager d'une évolution plus complexe du routage sédimentaire.

Avec cette étude combinée des flux et volumes de sédiments érodés et préservés, nous retraçons l'évolution sédimentaire du système Pyrénées-Aquitaine-Golfe de Gascogne pour enrelier les phases critiques de construction et destruction de la chaîne avec les processus responsables du routage sédimentaire.

Pour ce faire, nous combinons un modèle thermique d'inversion des données thermochronologiques qui documente l'évolution de l'érosion de la chaîne, avec l'analyse de nombreuses données de sismiques et forages en Aquitaine et Golfe de Gascogne pour évaluer les sédiments préservés et leur partitionnement dans ces deux bassins. Les dernières études d'emplissage syn- à post-orogénique ont permis de replacer, dans un cadre chronostratigraphique précis, l'évolution tectono-sédimentaire de ces deux bassins. Par cette approche, nous pouvons observer l'évolution du « mass balance » pyrénéen focalisé sur la partie Nord du système. Ces résultats nous permettent de quantifier (1) le stockage des sédiments depuis le Nord des Pyrénées jusqu'au bassin foreland Aquitaine au syn-orogénique et (2) l'export d'une grande partie de ces sédiments vers le golfe de Gascogne au post-orogénique. Nous en déduisons également le stockage transitoire des sédiments dans le bassin d'Aquitaine pendant ~20 Myr entre les stades (1) et (2), mettant en évidence un potentiel recyclage des sédiments avant leur export vers l'offshore.

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

Mots-Clés : Bassin d'Aquitaine, Pyrénées, Golfe de Gascogne, Thermochronologie, mass balance, Source to Sink



Etude de l'évolution des stades de déformation et de circulation de fluides d'un massif subalpin : le massif de la Chartreuse

Sana Ouahada^{1*}, Étienne Leroy¹, Antonio Benedicto¹, Yves Missenard¹,
José Daniel Muñoz Lopez², David Cruset³, Anna Travé²

¹ GEOPS - Université Paris Saclay –
France ² Universitat de Barcelona –
Espagne ³ Geosciences Barcelona -
Espagne

L'analyse structurale multi-échelle et multidisciplinaire est indispensable pour la caractérisation de l'évolution de la déformation cassante dans les chaînes de montagne, ainsi que dans l'établissement de la relation entre fracturation et circulation des fluides dans un cycle orogénique. Les analyses géochimiques des isotopes stables, du strontium et en particulier des isotopes du bore sur les calcites de remplissage de fractures, permettent d'avoir davantage d'informations sur les caractéristiques des fluides qui sont intervenus pendant la déformation. Le bore peut apporter des informations complémentaires sur le pH des paléofluides et par conséquent, dans la dissolution/minéralisation des calcaires pendant la déformation.

Cette étude d'analyse structurale de la fracturation sur le terrain et géochimique des ciments des fractures dans le massif de la Chartreuse, domaine subalpin, a comme objectifs de contraindre les événements géodynamiques et tectoniques qui ont eu lieu ainsi que la durée de fracturation et de circulation de fluides et d'apporter par la suite, plus de certitude sur le calendrier tectono-fluide. Pour cela, ce travail s'intéresse à des analyses macro et micro structurales, qui consiste à la réalisation d'une coupe géologique équilibrée, d'un schéma structural et à la détermination de l'orientation des paléocontraintes à partir de données orientées. Ce travail est mis en cohérence avec les données géochimiques des ciments calcitiques des fractures, afin d'aboutir à un calendrier d'évolution tectonique et de circulation de fluides.

Les résultats des analyses structurales, en particulier la détermination des paléocontraintes des onze générations de fracturation identifiées, confirment la phase extensive mésozoïque, la phase de transition extension-compression et la phase compressive alpine E-W.

Quant aux résultats des analyses géochimiques faites sur les différentes générations de calcite remplissant les fractures, ils montrent que la majorité des fluides qui ont circulé dans le massif au cours du cycle extension - compression, étaient d'origine marine. D'après les résultats des analyses géochimiques du bore, ces fluides deviennent de plus en plus acides depuis l'extension mésozoïque à la compression alpine ; ce qui pourrait être mis en corrélation avec l'exhumation de l'édifice orogénique.

Ces résultats ont permis de retracer toute l'histoire tectono-fluide et géodynamique du massif de la Chartreuse, de l'extension mésozoïque à l'inversion des contraintes lors de la compression alpine au cours du Cénozoïque.

Mots-Clés : Analyse structurale, analyse géochimique, fractures, calcite, isotopes bore, coupe géologique équilibrée.



Combining thermo-kinematic and mechanical modelling on thrust faults - a quantitative approach to crustal deformation history: Case study from SE Tibet

Paul Pitard ^{*1}, Anne Replumaz ¹, Marie-Pierre Doin ¹, Cédric Thieulot ², Marie-Luce Chevalier ^{3,4}, Philippe Hervé Leloup ⁵, Mingkun Bai ³, M. Balvay ¹, L. Haibing ^{3,4}

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, USMB, IRD, IFSTTAR, ISTerre, 38000 Grenoble, France.

² Mantle Dynamics and Theoretical Geophysics, Utrecht University, The Netherlands

³ Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 26 Baiwanzhuang Road, Beijing 100037, People's Republic of China.

⁴ Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, People's Republic of China

⁵ Laboratoire de Géologie de Lyon, CNRS UMR 5570, Université de Lyon 1, 69622 Villeurbanne, France.

Decoding the Tibetan plateau and its structural evolution has been a thorny issue for decades, triggering many controversial discussions between the proponents of the numerous key models. Numerical simulations of buoyancy forces associated with a thick crust and a low viscosity channel in the Tibetan crust predict continuous deformation, crustal uplift and thickening through an outward flow of partially molten middle/lower crust. Surface geological observations of fault systems, however, favor a model of localized deformation through the interaction between strike-slip and thrust faults. Here, we investigate the role of thrusting mechanisms involved in the plateau formation, which is essential in order to discuss these end-members competing models. We focus on the Muli thrust, a major Miocene thrust fault located at the eastern edge of the Tibetan Plateau, characterized by a pronounced topographic step of

~2000 m. We provide here an innovative quantitative approach combining thermo-kinematic modelling based on low-temperature thermochronology data, with conceptual 2-dimensional (2D) simulations of the crust's mechanical behavior. Using the code PECUBE, we test different scenarios of rock cooling by forward modelling and inversion method in order to constrain the amount and timing of exhumation, as well as its simplified first-order crustal geometry. Given that low-temperature thermochronology data only provides the thermal history of the upper part of the crust (<10 km), such thermo-kinematic modelling does not reveal any direct evidence of the potential implication of the lower crust. To overcome such limitations, we performed 2D mechanical modelling of the Muli thrust to constrain its mechanical behavior at the crustal scale to decipher its importance in the thickening of the plateau margin. We present here, how complementary numerical simulations based on in-situ geological observations on thrust faults, combined with thermochronology data, can be used to have a better understanding of the geological processes involved in the thickening of the Tibetan crust, and discuss both the strengths and weaknesses of such modelling.

Keywords: Tibetan Plateau, Thermochronology, Thermo-kinematic modelling, Mechanical modelling, Muli thrust, Yalong thrust belt, Crustal structure of Tibet, Formation Tibet





Exhumation rates calculation on the Carpathians fold and thrust belt from thermochronology database inversion.

Marion Roger ^{*1}, Peter van der Beek ², Arjan de Leeuw ¹, Laurent Husson ¹³

¹ ISTerre : Institut des Sciences de la Terre – Université Grenoble Alpes – France

² Institut für Geowissenschaften – Universität Potsdam – Germany

³ CNRS UMR 5275, ISTerre – Grenoble - France

The Carpathians are a fold and thrust belt of the Alpine orogeny. They were built during the Oligocene and Miocene, diachronously from North-West to South-East. The construction of the belt was largely contemporaneous with the foreland basin development (Roure et al., 1993). An axial transport system prograded from NW to SE in the foreland, finally also supplying sediments to the Black Sea (de Leeuw et al., 2020).

At first sight, the thermochronology data published for this belt do not reflect the diachronicity visible in the tectonic structures and sedimentology (Sanders et al., 1999; Merten et al., 2010). In our ongoing source to sink project, we aim to link the construction and erosion of the Carpathians with sediment transfer and deposition in the foreland basin. The evolution of depocentres in the latter is reconstructed using a Move (Petex) 3D model integrating geological maps, cross sections and field observations. To calculate exhumation, we use a new method to invert the thermochronology data of the whole chain with Pecube (Braun et al., 2012). By running inversions on data sets per nappe, the tectonic complexity of the Carpathians is kept and the spatial correlation bias plaguing previous whole-chain inversions is overcome (Schilgen et al., 2018).

In this presentation we will showcase this approach and provide exhumation rate estimates from the Carpathians, which we then correlate with eroded sediment volumes from the belt over time. The 3D model of the Carpathian Foreland Basin allow us to track sediment depocenter and retrace sediment flows during its evolution. We conclude with an outlook on the overall project of modelling of the belt and basin in TISC (Garcias-Castelliano et al., 2002), to obtain insights on the influence of slab pull and slab detachment on foreland development.

Mots-Clés : Carpathians, thermochronology, source to sink, foreland basin, 3D modelling



Permian detrital zircons in Triassic (?) marbles above the Beni Bousera peridotite-granulite unit; implications for the western Tethys opening.

Omar Saddiqi ^{1*}, Pilar Montero ², Christian Chopin³, Aboubaker Farah ¹,
AhmedChalouan ⁴, Michel Corsini ⁵ Fernando Bea ² and André Michard⁶

¹ Geosciences Laboratory, Faculty of Sciences Aïn Chock, Hassan II University, BP 5366, Maârif, Casablanca, Morocco.

² Department of Mineralogy and Petrology, University of Granada, Campus Fuentenueva, 18002 Granada, Spain.

³ Laboratoire de Géologie, UMR8538, Département de géosciences, École normale supérieure - CNRS, Université PSL, 75005 Paris, France.

⁴ Earth Sci. Dept, Faculty of Sciences, Mohamed V University, BP 1014, Rabat-Agdal, Morocco.

⁵ Géoazur, Université Côte d'Azur, CNRS, IRD, Observatoire de la Côte d'Azur, UMR 7329, 250, rue Albert- Einstein, 06560 Sophia Antipolis, France.

⁶ Em. Pr. Université Paris-Sud (Orsay), 10, rue des Jeûneurs, 75002 Paris, France.

The Gibraltar Arc is famous for its subcontinental peridotites that extend widely in Spain (Ronda) and Morocco (Beni Bousera). The age of exhumation of these mantle rocks is considered either basically as syn-orogenic (Alpine) or partly pre-orogenic. Here we report on marbles that crop out on top of the granulitic envelope (kinzigites) of the Beni Bousera peridotites. These calcite-dolomite Beni Bousera marbles (BBMs) have been regarded for years as interbedded in the granulites. However, we demonstrated recently (*Farah et al., 2021*) that they form lenticular outcrops restricted to the mylonitic shear zone between the granulites and the overlying gneiss unit (Filali–Beni Bousera Shear Zone). We also showed that the BBMs did not suffer the HP-HT metamorphism of the underlying granulites, but a HT-LP metamorphism comparable to that of the gneiss unit above. We focus here on the SHRIMP results we obtained on 157 detrital zircon grains extracted from 3 BBM samples. Most grains exhibit rims dated at ~21 Ma (Alpine recrystallization), whereas their cores yield ages from 270 to 3000 Ma. The well-marked ~270 Ma younger age cluster corresponds to the age of rhyolites and shallow crustal, sub-alkaline plutons emplaced in or next to the trans- tensional Permian basins of Morocco and Europe. Paleozoic peaks at ~460 and ~340 can be linked to the Cambro-Ordovician and Carboniferous magmatism of the Variscan orogen of the same area. Proterozoic and Archean dates are compatible with Gondwana sources, either primary (magmatic) or secondary (sedimentary cover). Our detrital zircon study establishes for the first time a post-Permian, likely Triassic age for the BBMs protoliths, which emplaced either by sedimentation or by sliding as extensional allochthons upon the granulites of the Beni Bousera unit. Thus, the Beni Bousera mantle rocks were exhumed at shallow depth in the framework of the southern margin of the Alboran domain during the Triassic-Early Jurassic rifting responsible for the birth of the Maghrebian Tethys. During the Alpine orogeny, the Beni Bousera unit and the overlying Triassic sedimentary rocks were affected by tectonic burial, thrusting, and metamorphism before their final exhumation.

Mots-Clés: SHRIMP U-Th-Pb dating/ Triassic rifting / mantle exhumation/ western Tethys/ Gibraltar Arc /Morocco.

Reference: Farah, A et al., 2021. The Beni Bousera marbles, record of a Triassic-Early Jurassic hyperextended margin in the Alpujarrides-Sebtides units (Rif belt, Morocco). BSGF - Earth Sci. Bull. 192. <https://doi.org/10.1051/bsgf/2021015>



The Marguareis Massif (southwestern Alps): A natural lab to unravel large-scale superposed fold systems at shallow levels tectonics in collisional setting

Edoardo Sanità ^{*1, 2}, Jean-Marc Lardeaux ³, Michele Marroni ^{1, 4}, Guido Gosso ⁵,
Luca Pandolfi ^{1, 4}

¹ Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa, Italia

² Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze, Italia

³ GéoAzur, CNRS Université de Nice-Sophia Antipolis, Francia

⁴ Istituto di Geoscienze e Georisorse, Italia

⁵ Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Milano, Italia

In the Marguareis Massif (southwestern Alps) a tectonic pile of Helminthoid Flysch and Briançonnais Units stacked toward SW occurs. The structurally highest Marguareis Unit shows a low- to very low-grade metamorphic imprint achieved during alpine collision starting from middle-Late Eocene. This unit consists of Mesozoic sedimentary rocks showing a transition from Triassic-Jurassic carbonates to middle-Eocene turbidite deposits. The exceptional exposure of Marguareis Unit along the southwestern sectors of Marguareis Massif, allow us to full decipher its intricate finite strain pattern recorded at different shallow structural levels.

In order to depict the finite strain pattern recorded by Marguareis Unit we performed a high-resolution geological mapping and micro-to map-scale structural analyses.

The intricate deformation history dealing with superposition of different generations of fold systems (D1, D2, D3 and Post-stacking (PS) folds) and faulting developed at different crustal depths. The firsts (D1, D2) are testified by penetrative granular-scale foliations (S1 and S2) associated to isoclinal SW- and NE-vergent folding systems (F1 and F2, respectively), up to km-scale amplitude, with scattered (A1) and NW-SE trending (A2) fold axes. The third folding event (D3) imposed thrusting of Marguareis Unit onto the underlying Helminthoid Flysch Unit, and it produces a knee-shaped km-scale fold (F3) with NW-SE trend developed at shallower crustal depth and unable to assist penetrative granular foliation. However, this folding event is responsible of an important re-orientation moving from NE toward SW of pre-existing structural features. The PS folds, shared by all the units and developed at very shallow crustal levels, overprint all the previous structures, including the unit-bounding shear zones. The faults represent the last deformation event recorded by the unit, but these turn out to be unable to significantly modify the architecture.

Keywords : Marguareis Massif, southwestern Alps, fold systems, shallow tectonics, collision



A key for deciphering the finite strain pattern in southwestern Alps: Insight from structural relationships between Helminthoid Flysch and Briançonnais Units (Marguareis Massif)

Edoardo Sanità ^{*1, 2}, Jean-Marc Lardeaux ³, Michele Marroni ^{1, 4}, Guido Gosso ⁵,
Luca Pandolfi ^{1, 4}

¹ Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa, Italia

² Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze, Italia

³ GéoAzur, CNRS Université de Nice-Sophia Antipolis, Francia

⁴ Istituto di Geoscienze e Georisorse, Italia

⁵ Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Milano, Italia

We document a stack of Low- to Very Low-grade Helminthoid Flysch and Briançonnais Units in southwestern sectors of Marguareis Massif (Italian-French border, southwestern Alps).

We performed a geological mapping and micro- to map-scale structural analyses to unravel the finite strain pattern of the area.

The units, from the structurally highest to the lowest, are: the Marguareis Unit (MU, Briançonnais Domain), Helminthoid Flysch Unit (FH) tectonically overlaying onto the Cima del Becco Slice and Cabanaira Unit (BS and CU respectively, Briançonnais Domain). FH consists of Late Cretaceous basin plain to deep-sea fan coarse-grained turbidite deposits. MU, BS and CU show Meso-Cenozoic sedimentary sequences showing a transition from Triassic-Jurassic carbonates to middle Eocene siliciclastic turbidites.

Tectonic unit recorded pre-, syn- and post-stacking deformation events. FH recorded two pre-stacking events (D_{1FH} , D_{2FH}). D_{1FH} is testified by S_{1FH} slaty cleavage. D_{2FH} produced a S_{2FH} crenulation cleavage associated to southwestward-vergent F_{2FH} folds. MU recorded two pre-stacking deformation events (D_{1MU} , D_{2MU}). D_{1MU} is represented by a pervasive S_{1MU} slaty cleavage associated to southwestward-vergent isoclinal F_{1MU} fold systems. D_{2MU} produced a S_{2MU} crenulation cleavage and associated northeastward-vergent F_{2MU} fold systems. The Cima del Becco Slice shows structural features similar to those depicted in MU. CU recorded one pre-stacking event (D_{1CU}) testified by the S_{1CU} slaty cleavage and southwestward-vergent F_{1CU} fold system. The Late Eocene-Early Oligocene syn-stacking events are testified by unit-bounding shear zones showing southwestward shearing responsible both for thrusting of the Helminthoid Flysch onto the Briançonnais Units and for the km-scale F_{3MU} fold (D_{3MU}) associated to thrusting of MU onto FH. The whole stack recorded the same post-stacking events represented by a fold system with sub-horizontal axial plane and faults.

Keywords : Marguareis Massif, strain pattern, Helminthoid Flysch, Briançonnais, southwestern Alps



The Perched Synclines of Central Tunisia: An Example of Diapir Rise – Fall – Rise Illustrated by Field, Seismic, and Experimental Data

Nedhir Sebai*¹, Bruno C. Vendeville ², Noureddine Boukadi ¹, and Ferid Dhahri ^{1,3}.

1: LR18ES37 : Laboratoire de Recherche Géodynamique, Géo-ressources, Géo-numérique, Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis El Manar, Tunisia.

2: Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, Lille, France.

3: Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences de Gafsa, Université de Gafsa, Campus Universitaire Sid Ahmed Zarroug, Gafsa, Tunisia.

Central Tunisia has been subjected to a complex series of successive regional tectonic phases, both extensional and compressional. This history is made even more complex by the presence of mobile Triassic evaporites that generated halokinetic deformation and partly decoupled the subsalt “basement” from the overburden.

At the southern end of a major regional lineament called “the North-South Axis” are some enigmatic structures cored by the Upper Eocene Jebbs Formations: the Kef Ennsour and Zebbeus structures. The center of these structures is made of synform (concave-upward) strata of Upper Cretaceous to Cenozoic age resting unconformably onto the Triassic evaporites. A significant part of the stratigraphic series (i.e., Lower Cretaceous) is missing in the perched syncline. The Cenozoic strata are particularly thick within the synclines, whereas they are thin or absent outside the synclines. In contrast, the Mesozoic series is continuous and thicker outside the synclines. These form topographic highs raised above the regional datum.

We hypothesize that these perched synclines have a halokinetic, rather than solely tectonic origin. The absence of parts of the lower stratigraphic series in the center of the structure indicates that the Triassic evaporites were rising as a passive diapir. During the Cenozoic, source-layer depletion combined with local extension forced the diapir to fall and its crest to subside, thus trapping thicker overburden strata within the syncline and bending them, resulting in a concave-upward geometry. During the latest stage a phase of regional shortening rejuvenated the fallen diapir, raising its synform roof above the regional datum.

We provide field and seismic data, as well as results from a set of analogue models of such a Rise-Fall-Rise structural history. The final geometry changes when varying the amounts and rates of passive diapir rise, sedimentation, extension, and late shortening. Results from most experiments closely match the geometries of the field examples from Central Tunisia. In addition, one model, in which the amount of diapir fall (and extrusion) was extreme, is very similar to the Tumb Diapir located offshore SW Iran.

Keywords: Central Tunisia, perched synclines; salt diapirs



How Himalayan collision stems from subduction

M. Soret^{1*}, K.P. Larson¹, J. Cottle², A. Ali³

¹ Earth and Environmental Sciences, University of British Columbia Okanagan, 3247 University Way, Kelowna, British Columbia, V1V 1V7, Canada.

² Earth Research Institute, University of California, Santa Barbara, Santa Barbara, CA93106, USA.

³ Department of Geology, University of Peshawar, Khyber Pakhtunkhwa 2510, Pakistan

*Corresponding author: math.soret@gmail.com

The mechanisms and processes active during the transition from continental subduction to continental collision at the plate interface are largely unknown. Rock records of this transition are scarce, either not exposed or obliterated during subsequent events. We examine the tectono-metamorphic history of Barrovian metamorphic rocks from the western Himalayan orogenic wedge. In this study, we demonstrate that these rocks were buried to amphibolite-facies conditions from ≤ 47 Ma to 39 ± 1 Ma, synchronously with the formation (46 Ma) and partial exhumation (45–40 Ma) of the ultrahigh-pressure eclogites. This association indicates that convergence during continental subduction was accommodated via development of a deep orogenic wedge built through successive underplating of continental material, including the partially exhumed eclogites, likely in response to an increase in interplate coupling. This process resulted in the heating of the subduction interface (from ~ 7 to ~ 20 °C/km) through advective and/or conductive heat transfer. Rapid cooling of the wedge from 38 Ma, coeval with the formation of a foreland basin, are interpreted to result from indentation of a promontory of thick Indian crust.

Keywords: Continental subduction; Collision initiation; Himalaya; Barrovian metamorphism; Petrochronology.



Resolving timing of early convergence from low-temperature thermochronology applied to Alpine-type systems

Sébastien Ternois ^{*1}, Frédéric Mouthereau ², Anthony Jourdon ³

¹ GEOPS - UMR 8148 CNRS-Université Paris-Saclay - Orsay, France

² GET - UMR 5563 CNRS-Université Toulouse III Paul Sabatier - Toulouse, France

³ TOTAL - Scientific and Technical Center Jean Féger CSTJF - Pau, France

Low-temperature thermochronology has been successfully applied to constrain exhumation or rates of change in topographic relief, hence resolving key issues on the relative role of climate and geodynamics into mountain building. Nonetheless, this approach may lack resolution at the earliest stage of collision when inversion and exhumation of thinned continental margins are not coupled with significant erosion, possibly maintaining temperatures above the sensitivity limit of low-temperature thermochronometers and thus delaying the cooling record.

We here examine the case of the Pyrenean orogenic system which is a particularly suitable setting to address crustal thermal and dynamic behavior during early orogenesis. There is a growing literature arguing for tectonic processes as principal cooling mechanism during early convergence, but we still lack details on how thermochronologic ages vary as a function of margin architecture and rates of convergence during early inversion of distal rifted margins. We take advantage of recently published thermo-mechanical models of tectonically-inverted hyper-extended rifts (contribution of the Orogen project TOTAL R&D-BRGM-INSU) and perform detailed forward modelling to predict thermochronologic age patterns across a Pyrenees-like orogen.

The upper plate margin is predicted to preserve a clear rifting-related cooling signal in its proximal domains and early convergence cooling in its distal part. Postrift thermal relaxation is shown not to be sufficient for thermochronologic clocks in distal domains to start during early convergence. In contrast, thermal overprint due to later collision is expected within the lower plate margin. The good agreement between these modelling results and published thermochronologic data and pre-orogenic crustal architecture reconstructions for the Pyrenees shows that low-temperature thermochronology can provide an important piece of information for reconstructing orogenesis from rifting to collision. This work clarifies the contribution of tectonic processes during early convergence. We believe that in other natural Alpine-type systems, low-temperature thermochronology can potentially identify similar processes involved in orogenesis, especially during early inversion of the distal rifted margins.

Mots-Clés : Pyrenees, low-temperature thermochronology, thermal history modelling, inheritance, early orogenesis, tectonic inversion



Geometric and kinematic evolution of the Middle Atlas mountain belt (Morocco) during the late Cenozoic

Yaaqoub Ahmed*¹ ; Essaïfi Abderrahim¹ ; Clementucci Romano² ; Ballato Paolo² ; Zayane Rachid¹.

1- *University of Cadi Ayyad, Marrakech, Morocco,*

2- *University of Roma Tre, Roma, Italy.*

The Middle Atlas mountain range represents the north-eastern branch of the Atlas system and spans approximately 2000 Km from the Atlantic coast of Morocco to Tunisia. The Atlas system constitutes one of the most prominent examples of active intracontinental mountain belts that developed in the African plate of the Cenozoic Alpine belt.

The Middle Atlas together with the High Atlas belts are inverted Mesozoic rift systems that began to rise during the Middle Eocene. Crustal deformation in the Middle Atlas is characterized by the predominance of transpressive tectonics. This is consistent with the oblique orientation of the chain with respect to the direction of maximum compression, which is NNW-SSE in northern Morocco at least during the Quaternary. Seismicity and geomorphic landforms suggest that tectonic deformation is still active.

In order to investigate the tectonic evolution of the Middle Atlas, we combined structural and geomorphic analysis. Our field observations suggest that the western boundary of the orogen, does not present evidences of recent tectonics (at least during the last 2Ma). In addition, the western foreland does not include syn-orogenic basins suggesting the lack of flexural subsidence. Conversely, although the age control of continental syn-orogenic deposits is limited, the eastern boundary of the orogen shows evidences of more recent deformation and flexural subsidence with the development of a foreland basin.

This suggests that the eastern orogenic boundary has accommodated a higher magnitude of Late Cenozoic contractional deformation.

Keywords: Middle Atlas, faults geometry and kinematic, tectonic geomorphology.



Kinematics of the Jinhe-Qinghe Thrust Belt: implication for the morphotectonic evolution of Southeast Tibet Plateau

Chengyu Zhu¹, Guo-can Wang^{1,2}, Philippe Hervé Leloup³, Kai Cao^{1,2}, Gweltaz Mahéo³, Yue Chen¹, Guiling Wu¹, Pan Zhang¹, Tianyi Shen¹, Bo Wu¹

- 1 Center for Global Tectonics, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China.
2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China.
- 3 Laboratoire de Géologie de Lyon: Terre, Planètes et Environnement, Université Claude Bernard, Villeurbanne, France.

The study about southeast Tibet is significant to understand the evolution of Asian monsoons and the timing as well as the mechanism of growth of the Tibet Plateau. Understanding the development of key thrust fault in SE Tibet not only helps to reconstruct the geodynamic but also the topography processes. Detailed field structure analysis along the nearly ~400 km long Jinhe-Qinghe thrust belt (JQTB) indicate thrust motion with minor left-lateral component. The cooling and exhumation history of the Baishagou granite based on apatite (U-Th)/He and fission track thermochronology and thermal modeling (QTQT) suggest an accelerated rapid increase in exhumation rate during 20-15 Ma at ~0.42 km/Myr. We interpret that fast exhumation is due to the activation of the Nibi thrust, a northern branch of the JQTB. The ~1.5-2.2 km magnitude of the exhumation is ~1.5-2.2 km, which corresponded to the present topographic difference across the thrust belt. In the early Miocene, the JQTB was a thrust system building significant relief along JQTB was generated by thrusting. When compared with previous studies it appears that Cenozoic exhumation and relief creation in SE Tibet does not follow a simple pattern that could not be explained by a single mechanism, and at least three stages of Cenozoic shortening and relief creation have to be invoked. The first phase is an Eocene NE-SW compression at least partly coeval with the Eocene sedimentation of the Eocene sediments. During late Oligocene to early Miocene the second thrusting phase occurred along the Yulong and Longmenshan thrust belts, and then migrated to the JQTB further to the southeast during 20-15 Ma. A third phase involved the activation of the left-lateral Xianshuihe fault and the re-activation of the Longmenshan thrust belts, Beichuan and Wulong faults in the LMS and the Muli thrust NW of the JQTB. The precise interaction between thrusting and fast river erosion triggered by climate change is not deciphered yet but the two Miocene to present thrusting along thrust belts the phases appears to explain most of the present-day relief in SE Tibet Yalong and LMS belts.

Mots-Clés : Southeast Tibet, low-temperature thermochronology, multistage history



Tectonic Control on Rapid Late-Miocene – Quaternary incision of the Mekong River knickzone, Southeast Tibetan Plateau.

Anne Replumaz ¹, Malwina San José ², Audrey Margirier ³, Peter van der Beek ³,
Cécile Gautheron ⁴, Philippe-Hervé Leloup ⁵, Xiong Ou ¹, Cao Kai ⁶, Guo-Can
Wang ⁶,
Yuan-Ze Zhang ⁶, Pierre G. Valla ¹, Mélanie Balvay ¹

¹ ISTerre, Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, 38058 Grenoble, France

² Dipartimento di Scienze Geologiche, Università di Roma Tre, Rome, Italy
3, 14476 Potsdam, Germany

⁴ GEOPS, Univ. Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, 91405 Orsay, France

⁵ Laboratoire de Géologie de Lyon, CNRS, Université de Lyon 1, Villeurbanne, France.

⁶ Hubei Key laboratory of Critical Zone Evolution, Center for Global Tectonics, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

The incision history of the Three Rivers (Salween, Mekong and Yangtze) region in the Southeast Tibetan Plateau has been linked to both tectonic and climatic controls. In this study, we report new apatite (U-Th)/He and fission-track thermochronology data from the >6000-m high Kawagebo massif, which forms the edge of the high plateau on the western flank of the steepened knickzone reach of the middle Mekong River valley. Thermal-history modeling of a thermochronological age-elevation profile shows rapid cooling since ~1.5 Ma and suggests a mean Quaternary exhumation rate of >1 km/Myr at the valley bottom. The amount of Quaternary exhumation is too high to be caused by fluvial incision alone and requires additional tectonic uplift. Comparing our data from the western flank of the Mekong River valley with published data from the eastern flank shows differential exhumation across the valley in the late-Miocene, with the western flank undergoing more exhumation, but relatively uniform exhumation in the Quaternary. We relate rapid exhumation since the late-Miocene on the western flank of the Mekong valley and the high topography of the Kawagebo massif to localized tectonic uplift associated with a restraining (left-stepping) overstep between the still-active right-lateral Parlung and Zhongdian strike-slip faults. The pattern of river steepness index across the knickzone also indicates that it results from locally focused uplift. Our results demonstrate the importance of detailed thermochronologic studies in this very active region to constrain the complex multi-phase tectonic history before invoking any potential climatic forcing of river incision.

Mots-Clés : Southeast Tibet, incision Mekong, thermochronology, tectonic forcing, climatic forcing.



Eocene migmatite formation and diachronous burial revealed by petrochronology in NW Himalaya, Zanskar

Pavla Štípská ^{1,2*}, Prokop Závada ^{2,3}, Stephen Collett ², Andrew R. C. Kylander-Clark ⁴, Bradley R. Hacker ⁴, Anne-Sophie Tabaud ², Martin Racek ^{5,6}

¹Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Institut de Physique du Globe de Strasbourg – CNRS UMR7516, Université de Strasbourg, 1 rue Blessig, F-67084, Strasbourg Cedex, France ; ²Center for Lithospheric Research, Czech Geological Survey, 11821 Praha 1, Czech Republic; ³Institute of Geophysics, Czech Academy of Sciences, Boční II 1a/1401, 141 31, Prague, Czech Republic ⁴Department of Earth Science, University of California, Santa Barbara, CA 93106, United States; ⁵Regional Geology of Crystalline Complexes Department, Czech Geological Survey, 11821 Praha 1, Czech Republic; ⁶Institute of Petrology and Structural Geology, Charles University in Prague, Albertov 6, Praha 2, 12800, Czech Republic

In this contribution we highlight the importance of in-situ monazite geochronology linked to P – T modelling for identification of timescales of metamorphic processes. Barrovian-type micaschists, migmatites and augengneiss from the SE extremity of the Gianbul dome have been studied in order to correlate the early stages of Himalayan metamorphism at different crustal levels and infer the timing of anatexis. P – T – t paths are constrained through combined pseudosection modelling and in situ and in mount monazite and xenotime laser ablation–split-stream inductively coupled plasma–mass spectrometry (LASS). Petrography and garnet zoning combined with pseudosection modelling show that grt-st schists record burial to ~630–660 °C, 7 kbar; st-ky schists to ~670–680 °C and 7–9 kbar; and grt-ky migmatites to >750 °C and >9 kbar. The grt-st schists indicate cooling on decompression, reequilibration occurred in the st-ky schists at ~600–670 °C and 4–6 kbar, in grt-ky migmatites at ~670–700 °C and 6 kbar, with local growth of and-crd. BSE images and compositional maps of monazite show variable internal structures from homogeneous through patchy zoning with embayed to sharp boundaries. Two grt-st schists–recorded only ~31–27 Ma ages in porphyroblasts and no ~40 Ma ages. The st-ky schist, grt-ky migmatites, augengneiss, have both the older, ~44–37 Ma ages in porphyroblasts and younger ages down to ~22 Ma. These significantly different ranges from porphyroblasts of 44–37 Ma, and 31–27 Ma, are interpreted as the duration of prograde P – T paths, and indicate diachronous two-stage burial of rocks. Early migmatization occurred at 38 Ma. The c. 29 Ma is interpreted as the time when rocks from the lower and middle crustal levels were partially exhumed and came in to contact with rocks that were downgoing at this time. Localized monazite recrystallization is as young as 26–24 Ma. The youngest ages of 23–22 Ma are related to leucogranite emplacement.

Mots-Clés : Monazite dating and REE; monazite growth and recrystallization; prograde and retrograde P – T – t path; Zanskar Himalaya; Eohimalayan metamorphism



T1.3 Paléoreliefs et paléoaltitudes



Exhumation différentielle des massifs du Canigou et de la Carança (Pyrénées) révélée par la thermochronologie (U-Th)/He : le rôle de la faille de Py

Valentine Combaudon^{*1}, Gauthier de Montbrun¹, Gaétan Milesi¹, Philippe Münch¹, Patrick Monié¹, Roger Soliva¹, Delphine Charpentier², Michael Bonno¹, Céline Martin¹, Arthur Iemmollo¹ et Mathieu Bellanger³

1 - Géosciences Montpellier, Université de Montpellier, CNRS, Université des Antilles - France
2 - UMR Chrono-environnement, Besançon - France
3 - TLS Geothermics - France

A l'Est des Pyrénées, les données thermochronologiques de Maurel et al. (2008) montrent que le massif Canigou-Carança est exhumé entre 32 et 18 Ma en lien avec le jeu normal de la faille de la Têt d'orientation NE-SO lors de l'ouverture du Golfe du Lion. Dans cette étude, nous distinguons deux blocs au sein de ce massif, séparés par la faille normale de Py orientée ENE-OSO : le bloc Canigou à l'Est et le bloc Carança à l'Ouest. Les massifs du Canigou (2783 m) et de Costabonne (2465 m) au mur de la faille de Py présentent des altitudes plus élevées que ceux situés au toit, Tres Estelles (2095m) et Carança (2505 m). 25 nouvelles datations (U-Th)/He sur apatite (AHe) ont été réalisées de part et d'autre de la faille de Py permettant de caractériser les taux de dénudation et de refroidissement des deux massifs.

Les âges AHe obtenus dans le massif du Canigou suggèrent un taux moyen de dénudation de 120 ± 30 m/Ma entre 33 et 15 Ma, en accord avec les estimations antérieures. Les nouveaux âges obtenus dans le massif de la Carança indiquent un taux de dénudation plus faible de l'ordre de 60 ± 10 m/Ma entre 28 et 10 Ma. L'histoire thermique modélisée sur la base des données thermochronologiques basse température montre que le bloc Canigou subit un refroidissement rapide au Rupélien, qui n'est pas enregistré dans le bloc Carança. L'activité de la faille de Py permet d'expliquer l'exhumation du bloc Canigou au mur de la faille de Py. Une seconde phase de refroidissement majeure est enregistrée par les blocs Canigou et Carança au Chattien-Aquitainien (28-20 Ma), qui correspond au jeu normal de la faille de la Têt. Une dernière phase de refroidissement entre 12 et 9 Ma est enregistrée dans le bloc Carança associé à une propagation de la déformation vers l'Ouest. La mise en évidence d'une différence d'exhumation des massifs du Canigou et de la Carança suggère une activité majeure de la faille de Py au Rupélien. La réalisation de datations Ar-Ar sur les gouges de la faille de Py permettra de mieux discuter l'activité de la faille de Py et son impact sur l'histoire thermique du massif Canigou-Carança.

Mots-Clés : Thermochronologie basse température, Pyrénées, Faille de Py, Faille de la Têt.



Les paysages glaciaires exhumés d’Afrique australe : L’héritage géomorphologique de la glaciation tardi- paléozoïque

Pierre Dietrich^{1*}, François Guillocheau¹ & Cécile Robin¹

Géosciences-Rennes, UMR6118, Université de Rennes 1, 35042 Rennes Cedex, France

Les interactions existantes entre déformation lithosphérique, dynamique mantellique et processus glaciaires permettent la création, en domaines de marges continentales, de reliefs très marqués généralement considérés comme étant transitoire. Sur les cratons d’Afrique australe toutefois (cratons du Congo, du Kaapvaal et du Zimbabwe), de profondes vallées caractérisées par des profils topographiques en U et dans lesquelles coulent les rivières actuelles, correspondent à des paléofjords, à des vallées glaciaires et à des overdeepenings exhumés datant de la glaciation tardi-paléozoïque (Carbonifère-Permien). La présence de stries glaciaires sur les interfluves et de dépôts sédimentaires glaciogéniques et côtiers dans les vallées indiquent d’une part que la morphologie originelle de ces reliefs est parfaitement préservée mais permet également d’attribuer une paléoaltitude précise à ces paléoreliefs glaciaires. Par ailleurs, ces vallées glaciaires sont incisées perpendiculairement à une série d’escarpements subverticaux séparés par des surfaces horizontales étagées, conventionnellement interprétés comme résultant du rifting crétacé sud-atlantique suivi de processus d’aplanissement d’échelle continentale, ce qui indique que ce relief étagé est antérieur à la glaciation tardi-paléozoïque et résulte probablement de processus tectoniques liés à des mouvements verticaux différentiels existants entre le craton du Congo et la ceinture panafricaine. La présence de fjords et de dépôts côtiers à des altitudes actuelles de plusieurs centaines de mètres permet en outre de quantifier les mouvements verticaux post-glaciation imputables au superplume sud-africain.

Mots-Clés : fjords, glaciation, Carbonifère, Permien



Soulèvement pliocène du Massif Central (France) mis en évidence par la quantification des paléoaltitudes du Stratovolcan du Cantal et du site de Murat

Séverine Fauquette ^{*1}, Jean-Pierre Suc ², Speranta-Maria Popescu ³,
François Guillocheau⁴, Sophie Violette ⁵, Anne Jost ⁶, Cécile Robin ⁴, Justine
Briaïs ⁷, Guillaume Baby ⁴

¹ Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier, Université de Montpellier, CNRS, IRD, EPHE, France

² Institut des Sciences de la Terre de Paris, Sorbonne Université, CNRS-INSU, France

³ Geobiostratdata.consulting, Rillieux la Pape, France

⁴ Géosciences Rennes, Université de Rennes, CNRS, France

⁵ Laboratoire de Géologie de Lyon, ENS-PSL Université, CNRS, France

⁶ Milieux environnementaux, transferts et interactions dans les écosystèmes et les sols (METIS), Sorbonne Université, UPMC Université Paris 6, France

⁷ BRGM, France

Le Massif central français est un relief clé du territoire français. Cette région a connu une période intense de volcanisme alcalin, commençant par l'édification du Stratovolcan du Cantal à 11 Ma et se terminant à 3 Ma. Pour quantifier la paléo-élévation du Stratovolcan et pour le replacer dans le cadre de l'histoire du soulèvement du Massif Central, nous avons d'abord reconstitué la végétation et le climat basés sur des analyses polliniques dans les diatomites de Murat, déposées dans un lac de maar dont on a précisé l'âge de 5,52 à 5,33 Ma. La végétation était organisée selon trois étages différents : un marécage à *Glyptostrobus* (cypres-chauve) autour du lac ; une forêt mixte au-delà et, à plus haute altitude, une forêt de conifères (*Cathaya*, *Cedrus*, *Tsuga*, *Picea* et *Abies*) (Fauquette *et al.*, 2020).

Les estimations climatiques obtenues par la méthode des amplitudes climatiques indiquent des températures moyennes annuelles comprises entre 11,4 et 17°C. En utilisant ces estimations et par comparaison avec des sites contemporains, nous déduisons une paléo-élévation pour Murat entre 710 et 930 m d'altitude. Ce site a donc subi un soulèvement de 130 à 350 m pendant le Pliocène inférieur, ce qui a entraîné une réorganisation du réseau de drainage avec des rivières coulant de la bordure nord du Massif Central vers l'océan Atlantique. Notre étude confirme que le stratovolcan du Cantal était un volcan qui atteignait une altitude élevée au Pliocène inférieur (>2500 m) avant son démantèlement progressif lors des épisodes glaciaires du Pléistocène (Fauquette *et al.*, 2020).

Fauquette S. *et al.*, 2020. Journal of the Geological Society, in press.

Mots-Clés : Massif Central, Stratovolcan du Cantal, pollen, végétation, paléoclimat, paléoaltitude, Pliocène



Tectono-thermal history of the intraplate San Bernardo fold and thrust belt in central Patagonia inferred by low-temperature thermochronology

Marie Genge^{1,2*}, Alexis Derycke³, Cécile Gautheron³, Massimiliano Zattin², César Witt¹, Stefano Mazzoli⁴, Xavier Quidelleur³

1 Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, F 59000 Lille, France

2 Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova, via G. Gradenigo 6, 35131 Padova, Italy

3 Université Paris-Saclay, CNRS, GEOPS, 91405, Orsay, France

4 School of Science and Technology, Geology Division, University of Camerino, Italy

First low-temperature thermochronology data across the central Patagonia and thermal modeling provide information on the thermal history of the intraplate San Bernardo fold and thrust belt (44–46 °S). Apatite (U–Th–Sm)/He (AHe), fission tracks (AFT) ages and inverse thermal modeling indicate that the sedimentary rocks presently at the surface of the southwestern San Bernardo FTB have experienced a broadly similar thermal history: i) cooling at the deposition time during the Cretaceous, ii) a significant Eocene – early Miocene thermal event which totally reset the AHe data and partially the AFT data, and iii) a cooling since the early Miocene. Although former thermochronology studies in surrounding areas do not evidence any Neogene thermal event, our regionally consistent ages and thermal modeling most likely indicate a large-scale thermal event through the Eocene to the early Miocene. As sedimentary burial was not significant in this area through the Cenozoic, we propose that this heating episode might have been caused by coeval widespread and long-term intraplate volcanic processes associated with a modest burial and the increase of the geothermal gradient in the entire area, which has been strong enough to significantly affect the low-temperature thermochronometers regionally. A subsequent slow cooling phase starting from early Miocene may have been related with the termination of this intraplate volcanic phase and subsequent decrease of the thermal gradient to average values, and with a modest exhumation of ~1 km at most related to a mild deformation episode of the broken foreland and dynamic topography processes during the middle-late Miocene, as well as the weathering of the Oligo-Miocene basalts.

Mots-clés : low-temperature thermochronology, broken foreland, intraplate magmatism, Patagonia

*Marie Genge



Reconstruction des paléoreliefs anorogéniques (plateaux s.l.) à partir de l'analyse des formes du relief de type pédiment/pédiplaine

François Guillocheau^{*1}, Cécile Robin¹, Pierre Dietrich¹

1- Univ Rennes – CNRS, Géosciences-Rennes, UMR 6118, 35000 Rennes

Les reliefs anorogéniques de type plateaux, dômes ou plaines constituent près de 70% du relief terrestre. Ces plateaux et dômes, souvent de grandes longueurs d'onde (>100 km jusqu'à x1000 km), résultent de déformations d'échelle lithosphérique ou mantellique et sont des producteurs importants de sédiments ou de solutés par érosion physique ou chimique.

CARACTERISTIQUES GEOMORPHOLOGIQUES DES RELIEFS ANOROGENIQUES

Les plateaux résultent de l'étagement de pédiments ou pédiplaines, c'est-à-dire des surfaces subplanes érosives se raccordant en amont à un escarpement plus ou moins prononcé. Les surfaces subplanes se raccordent à un niveau de base local (lac) ou global (mer). Les pédiments peuvent être contemporains ou antérieurs à une intense altération chimique de type latérite.

Ces pédiments peuvent être datés (1) par datation des altérites elles-mêmes ((U-Th)/He sur goethite, Ar-Ar sur cryptomélane, paléomagnétisme..), (2) par datation des sédiments qui les recouvrent ou (3) par leurs relations géométriques avec du volcanisme daté. Que ce soit au Brésil, en Afrique ou Europe, les surfaces les plus hautes sont les plus vieilles et les plus basses les plus jeunes.

Néanmoins, aucun pédiment n'arrête jamais d'évoluer, soit par recul lent de l'escarpement (x1m-x10m/Ma) ou par une dégradation par des vallées incisées postérieures au paroxysme de formation du pédiment.

RECONSTITUTION DES PALEORELIEFS

L'âge différent des pédiments étagés montre qu'ils ne résultent pas du recul simultané de l'ensemble des escarpements amont, mais bel et bien de formations successives en réponse à une chute du niveau de base, principalement en réponse à une surrection (« surface uplift »). La hauteur d'un escarpement entre deux surfaces subplanes de pédiments successifs, traduit donc le déplacement vertical fini et peut donc être utilisé pour reconstituer l'évolution topographique du plateau ou dôme.

Pour une époque donnée, le pédiment alors actif est restauré dans sa position dynamique, c'est-à-dire connecté à son niveau de base de l'époque en enlevant le déplacement vertical enregistré par les pédiments plus jeunes. Cela consiste à enlever les hauteurs cumulées d'escarpements plus jeunes sur tout le pourtour du plateau ou du dôme considéré.

Cette méthode a été développée sur les plateaux et dômes d'Afrique australe.

Mots-Clés : Géomorphologie, pédiment, Afrique australe, paléorelief



Datation (U-Th-Sm)/He des cuirasses ferrugineuses en Guyane française : implications paléogéomorphologiques

Beatrix Heller ^{*1,2}, Silvana Bressan Riffel³, Thierry Allard², Guillaume Morin²,
Jean-Yves Roig⁴, Renaud Couëffé⁴, Cécile Gautheron¹

¹ Université Paris-Saclay, CNRS, GEOPS - France

² Sorbonne Université, CNRS, IMPMC – France

³ Université Fédérale de Rio Grande do Sul, Porto Alegre - Brésil

⁴ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

Les sols latéritiques se développent dans des conditions d'altération chimique intense dans la zone tropicale où l'érosion physique n'est pas dominante. Ils résultent du transfert d'éléments chimiques entre les différents compartiments de la zone critique et de la précipitation de phases supergènes secondaires comme les minéraux argileux, les oxydes ou oxyhydroxydes de fer (i.e. hématite et goéthite), les oxydes d'aluminium et les oxydes de manganèse. Le sol latéritique va se compartimenter minéralogiquement et générer une saprolite plus ou moins épaisse et coiffée d'une cuirasse riche en fer ou en aluminium. De tels profils latéritiques se forment sur plusieurs millions d'années et sont des marqueurs morphologiques de la stabilité des paléosurfaces. Malgré leur large extension à la surface de la terre, on manque encore de contraintes temporelles de leur formation, de leur évolution et des relations avec les changements climatiques passés. Néanmoins, les premières études chronologiques montrent que les latérites représentent une archive géologique au moins tout au long de l'ère Cénozoïque. De plus, les échantillons de cuirasse peuvent contenir plusieurs générations coexistantes d'hématite et de goéthite indiquant des processus de dissolution et reprécipitation. Leur datation permet alors de reconstituer l'évolution des épisodes majeurs d'altération et d'évolution morphologique d'une région.

Cette étude se concentre sur la géochronologie d'altération dans le nord-est de la Guyane Française où des cuirasses ferrugineuses se sont développées sur des roches mafiques et intermédiaires du Paléoprotérozoïque. Cette étude offre l'opportunité de documenter l'évolution de cette partie du Bouclier Guyanais, connu comme une région tectoniquement stable depuis le Crétacé. Deux sites d'échantillonnage (Kaw et Baduel), ont été sélectionnés car ils se situent à des altitudes différentes (300 et 100 m d'altitude respectivement) et ont fait l'objet de datations paléomagnétique, fournissant des âges de 50 ± 10 Ma et 10 ± 5 Ma pour Kaw et 40 ± 20 pour Baduel [1]. Toutefois, ces datations demeurent imprécises en raison de la faible migration de l'Amérique du Sud pendant le Cénozoïque. Afin de préciser les âges de ces formations et ainsi raffiner la compréhension de leur évolution, une étude couplant datation (U-Th-Sm)/He, géochimie et minéralogie de différentes générations d'hématite et de goéthite a été réalisée. 250 âges (U-Th-Sm)/He ont été obtenus pour les deux sites : ils varient de 32 ± 3 Ma à 0.5 ± 0.1 Ma pour Kaw et 16 ± 2 à 1.8 ± 0.3 Ma pour Baduel. Ces données, dont la précision est meilleure que celle des données de paléomagnétisme, montrent une distribution des âges des différents faciès échantillonnés. Les âges déterminés dans cette étude sont aussi systématiquement moins anciens que ceux estimés par paléomagnétisme. Ils révèlent le développement d'une altération intense depuis l'Oligocène pour Kaw et le Miocène pour Baduel, soulignant le caractère relictuel de ces paléosurfaces. Par ailleurs, l'identification des relations pétrologiques et géochimiques entre les différentes phases minéralogiques montrent des relations complexes de la dynamique d'altération jusqu'au Quaternaire.

Théveniaut H., and Freyssinet, P. (2002): Timing of lateritization on the Guiana Shield: synthesis of paleomagnetic Results from French Guiana and Suriname. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (178) 91-117.

[1]

Mots-Clés : (U-Th-Sm)/He, altération, géochronologie, cuirasse, laterite



Paléo-altimétrie du Massif du Mont Blanc à partir des inclusions fluides des quartz hydrothermaux, et implications sur son évolution tectonique.

Gweltaz Mahéo^{1*}, Raphaël Mélis¹, Véronique Gardien¹, Philippe-Hervé Leloup¹, Antoine Mercier¹, Nicolas Arnaud², Patrick James³, Eric Bonjour³, Christophe Lecuyer¹

1 Laboratoire de Géologie de Lyon, Terre, Planètes, Environnement (LGLTPE) – CNRS – UMR 5276, Université Claude Bernard Lyon 1 – France

2 Geosciences Montpellier – CNRS – UMR 5243 – Montpellier – France

3 Institut des Sciences Analytiques (ISA) – UMR 5280 – Villeurbanne – France

L'exhumation et la structuration du Massif du Mont Blanc, dans les Alpes Occidentales, sont associées à plusieurs modèles structuraux incluant la réactivation de structures ante-alpine, un plissement d'échelle crustale ou encore l'activation de chevauchements et rétrochevauchements hors séquence. Ces différents modèles peuvent être évalués, entre autres, en reconstituant l'évolution spatiale et temporelle de l'altitude du Massif. Pour ce faire nous avons utilisé la méthode nouvellement développée consistant à mesurer la composition isotopique en oxygène et hydrogène des inclusions aqueuses piégées dans des fentes de quartz. Si la source de ce fluide est d'origine météorique il est alors possible de déterminer l'altitude moyenne du Massif au moment des précipitations. Les mesures sont réalisées sur une série de zones minéralisées riches en quartz hydrothermaux incluant les fours à quartz du Mont Blanc ainsi que les zones de cisaillements associées aux différentes phases de déformation reconnues et datées dans la région. L'étude est complétée par des datations Ar/Ar sur les adulaires associés aux quartz. Les résultats obtenus permettent d'une part de discuter l'origine et la circulation des fluides dans le Massif du Mont Blanc et d'autre part de mieux contraindre son évolution tectonique.

Mots-Clés : Mont Blanc, paléoaltitude, inclusion fluides, exhumation, tectonique



Premières preuves de la préservation de surfaces dévoniennes en Afrique du sud-est : nouveaux apports de la datation de cuirasses latéritiques

Maximilien Mathian ^{1*}, Guillaume Baby ², Emmanuelle Chanvry ³, Charlotte Fillon ³, François Guillocheau ⁴, Patrick Raffiki ⁵, Rosella Pinna-Jamme ¹, Frédérique Bouchard ¹,
Cécile Quantin ¹, Jean-Noël Ferry ³, Cécile Gautheron ¹

¹GEOPS – Université Paris-Saclay – UMR CNRS 8148 – France

²IPGP – Université Sorbonne Paris Cité – UMR CNRS 7154 –

France ³Total R&D – Total Scientific and Technical Center Jean

Féger – France ⁴Géosciences Rennes – Université Rennes 1 –

UMR CNRS 6118 – France ⁵Malawi Geological Survey

Department – Malawi

Environ 70% du relief émergé terrestre est caractérisé par des surfaces érosives possédant un faible gradient topographique, aussi appelées surfaces d'aplanissement. Certains géomorphologues défendent l'idée que ces surfaces sont des reliques d'anciens paléoreliefs, partiellement préservés des phénomènes d'érosion durant des dizaines de millions d'années. Une telle préservation en ferait les témoins privilégiés de l'évolution des surfaces continentales, depuis la formation de ces surfaces jusqu'à nos jours. Certaines des plus hautes surfaces d'aplanissement d'Afrique, localisées à plus de 2000 m d'altitude, sont considérées dans la littérature comme étant des reliques d'une surface Mésozoïque, la Gondwana surface (King, 1962). En particulier, le plateau de Nyika (ca 2200 a.s.l.), localisé au nord du Malawi, est l'une des plus importantes reliques potentielles de cette paléosurface. Toutefois, la possibilité de préserver des reliefs aussi anciens est un sujet débattu dans la littérature, particulièrement sous un climat tropical. L'exploration de ce plateau a permis d'identifier un niveau de cuirasse détritique, aujourd'hui sur un haut-topographique. Cette cuirasse, composée de clastes d'une cuirasse primaire riche en hématite cimentés par une matrice goethitique, a été datée grâce à la méthodologie de datation (U-Th)/He des oxydes et hydroxydes de fer. L'analyse minéralogique et géochimique de grains en provenance des clastes hématiques révèle la complexité de ces zones, qui sont pour la plupart composées d'un mélange de générations d'oxydes de fer. La datation de cette cuirasse a toutefois permis de faire ressortir que sa matrice possède un âge Quaternaire. A contrario, certains clastes préservés, peu impactés par les phénomènes de dissolution/recristallisation à l'origine des mélanges générationnels, possèdent des âges remontant au Dévonien.

La topographie initiale du plateau n'a pas été préservée, des bancs de cuirasses détritiques se retrouvant aujourd'hui sur des hauts topographiques. Toutefois, ces résultats montrent que des cuirasses détritiques se sont développées sur cette surface, ou sur une surface supérieure adjacente, au cours du Dévonien avant d'être érodées pour permettre de former les cuirasses aujourd'hui en surface. Par ailleurs, cette étude tend à supporter l'idée que le cuirassement des plateaux en contexte tropical joue un rôle clé dans leur préservation.

Mots-Clés : Datation (U-Th)/He, Minéralogie, Cuirasse latéritique, Paléosurfaces



Enregistrement thermo-cinématique de l'exhumation des massifs bordant la faille de la Têt (Est des Pyrénées, France) par la thermochronologie basse-température

Gaétan Milesi^{*1}, Pierre G. Valla², Patrick Monié¹, Roger Soliva¹, Philippe Münch¹,
Michael Bonno¹, Céline Martin¹ et Mathieu Bellanger³

1 - Géosciences Montpellier, Université de Montpellier, CNRS, Université des Antilles - France

2 - Institut des Sciences de la Terre (ISTerre), Université Grenoble Alpes, Université Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTAR - France

3 - TLS Geothermics - France

L'histoire d'exhumation Cénozoïque de la partie Est des Pyrénées et les mécanismes tectono-géomorphologiques associés restent débattus, notamment de par le manque de contraintes temporelles spatialement réparties. Dans ce contexte, la faille de la Têt est un accident normal d'échelle crustale, accommodant l'ouverture du Golfe du Lion à l'Oligo- Miocène. L'activité tectonique le long de cette faille est responsable de la construction des massifs du Canigou et de la Carança au mur de la faille. Cependant la variabilité spatio- temporelle de cette activité tectonique reste mal contrainte.

Dans cette étude, nous avons réalisé la compilation des données existantes à l'échelle de la partie Est des Pyrénées complétée par l'acquisition de données (U-Th)/He sur apatite et zircon, et traces de fission sur apatite dans 30 nouveaux échantillons provenant des massifs du Mont-Louis, Canigou et Carança. La distribution spatiale de ces données permet de quantifier l'histoire d'exhumation régionale et de discuter la variabilité observée en termes de variation de l'activité tectonique le long de la faille de la Têt. La modélisation thermique 1D (QTQt) et thermo-cinématique 3D (Pecube) de l'ensemble des données thermochronologiques a permis de préciser l'évolution thermique et l'histoire d'exhumation des différents massifs. Les résultats mettent en évidence une phase de refroidissement importante enregistrée entre 38 et 35 Ma dans le massif du Mont-Louis au toit de la faille de la Têt. Cette phase est associée au fonctionnement de chevauchements à vergence sud durant l'Éocène terminal, avec des taux d'exhumation de l'ordre de 0,6 km/Ma, suivie par un ralentissement important de l'exhumation (~ 0,1km/Ma).

Les massifs du Canigou et de la Carança, situés au mur de la faille de la Têt, enregistrent une phase d'exhumation majeure entre 35 et 24 Ma associée au fonctionnement de la faille de la Têt lors de l'ouverture du Golfe du Lion et du retrait du slab apennin en Méditerranée. Les âges (U-Th)/He sur apatite témoignent d'une deuxième phase d'exhumation aux alentours de 10 Ma, dans la partie ouest du massif de la Carança. Cette nouvelle phase marquerait une réactivation de la faille de la Têt, plus prononcée à l'Ouest, et expliquerait la présence de facettes triangulaires plus marquées et le remplissage essentiellement miocène supérieur du bassin de Cerdagne le long de ce segment de faille.

Mots-Clés : Thermochronologie basse température, Faille de la Têt, Modélisation thermo-cinématique, Pyrénées.



Composition isotopique de l'H et de l'O de l'eau des inclusions fluides de quartz: Nouvelle méthode pour la paléoaltimétrie

Raphaël Melis ^{*1}, Véronique Gardien ¹, Gweltaz Mahéo ¹, Christophe Lécuyer ¹,
Philippe-Hervé Leloup ¹, Patrick Jame ², Eric Bonjour ²

¹ Laboratoire de Géologie de Lyon (LGL) – CNRS – UMR 5276, Université Claude Bernard Lyon 1 – France

² Institut des Sciences Analytiques (ISA) – CNRS – UMR 5280, Villeurbanne – France

La paléoaltimétrie est un outil puissant utilisé dans le domaine des sciences de la Terre permettant d'étudier les interactions entre l'évolution de la topographie, les phénomènes tectoniques et climatiques. Cette approche consiste à estimer la paléoaltitude ou les paléoreliefs d'une chaîne de montagne ou d'un plateau orogénique à une période donnée. Plusieurs méthodes sont utilisées pour y parvenir, parmi celles-ci, la paléoaltimétrie basée sur les isotopes stables consiste à utiliser la composition des paléo-précipitations qui se déversaient à haute et à basse altitude à une certaine période et au niveau de la zone étudiée. En effet il a été démontré que les rapports isotopiques de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) et de l'hydrogène (δD) des précipitations orographiques diminuent au fur et à mesure que l'altitude des reliefs augmente suivant un gradient isotopique variable (Poage et al., 2001). L'analyse du $\delta^{18}\text{O}_{(\text{mineral})}$ ou du $\delta\text{D}_{(\text{mineral})}$ de minéraux comme certains carbonates et les phyllosilicates formés à partir d'eau météorique permet de calculer le $\delta^{18}\text{O}_{(\text{water})}$ et le $\delta\text{D}_{(\text{water})}$ des paléo-précipitations en estimant la température à laquelle le fractionnement isotopique entre l'eau et le minéral a eu lieu. Cependant, l'estimation imprécise de cette température génèrent d'importantes marges d'erreur pouvant dépasser les $\pm 1000\text{m}$.

Nous avons développé une méthode permettant de mesurer directement et conjointement le $\delta^{18}\text{O}_{(\text{water})}$ et le $\delta\text{D}_{(\text{water})}$ de l'eau des paléo-précipitation avec une grande précision ($\pm 0,39\text{‰}$ et $1,53\text{‰}$) pour le $\delta^{18}\text{O}_{(\text{water})}$ et le $\delta\text{D}_{(\text{water})}$ respectivement et permet notamment de réduire les marges d'erreur de l'estimation paléoaltimétrique à moins de $\pm 150\text{m}$. Cette méthode consiste à extraire et analyser de petites quantités de fluides ($\sim 10\mu\text{L}$) piégées dans les minéraux de quartz au moment de leur croissance. L'extraction des inclusions fluides est réalisée à l'aide d'une ligne sous vide et l'analyse isotopique est réalisée dans un second temps avec un spectroscope (OA-ICOS) situé à l'Institut des Sciences Analytiques de Lyon (ISA). Nous avons testé ce protocole sur des veines de quartz alpines provenant des massifs du Mont Blanc et du Chenaillet. Les résultats obtenus montrent que l'eau extraite correspond à de l'eau météorique et que sa signature isotopique a été conservée au cours des temps géologiques. Ces données montrent que le massif du Mont-Blanc était à basse élévation (moins de 1000m a.s.l.) au Miocène moyen. En revanche, les données provenant du massif du Chenaillet indiquent qu'il avait déjà atteint son altitude moyenne actuelle ($\sim 2500\text{m a.s.l.}$) à la même période.

Mots-Clés : Paléoaltimétrie, inclusions fluides, isotopes stables, quartz



Le soulèvement du Massif Central, Crétacé à Cénozoïque supérieur : évidences thermochronologiques.

Valerio Olivetti ^{*1,2}, Maria Laura Balestrieri³, Vincent Godard¹, Olivier Bellier¹,
Cécile Gautheron⁴, Pierre G. Valla^{5,6}, Massimiliano Zattin², Claudio Faccenna⁷,
Rosella Pinna-Jamme⁴, Kevin Manchuel⁸.

¹ Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, Coll France, CEREGE, Aix-en-Provence, France

² Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova, Italy.

³ CNR, Istituto di Geoscienze e Georisorse, Firenze, Italy.

⁴ GEOPS, Université Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, 91405 Orsay, France.

⁵ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, ISTERre, 38000 Grenoble, France. ⁶ Institute of Geological Sciences and Oeschger Center for Climate Research, University of Bern, Bern, Switzerland.

⁷ Dipartimento di Scienze, Università di Roma Tre, Italy.

⁸ EDF-DIPNN-DI-TEGG, Aix en Provence, Cedex 02, France.

Le Massif Central français est une partie de la chaîne Varisque qui présente aujourd'hui une topographie élevée associée à un potentiel rajeunissement cénozoïque et un volcanisme fini- tertiaire à quaternaire. Il est localisé dans l'avant-pays des chaînes alpine et pyrénéenne mais son évolution Cénozoïque n'est pas associée à une tectonique compressive ou extensive alpine. Par conséquent, des processus profonds contrôlés par la remontée mantellique sont généralement invoqués pour expliquer l'origine du soulèvement cénozoïque, bien que la chronologie et la quantification de la formation du relief restent peu contraintes. Nous présentons ici une étude thermochronologique basée sur de nouvelles données (U-Th)/He et traces de fission sur apatites qui ont été intégrées aux données déjà publiées (Barbarand et al., 2001; Gautheron et al., 2009) pour reconstruire l'histoire de l'exhumation de la marge orientale du massif. Les données (U-Th)/He et traces de fission sur apatites montrent des âges crétacés pour les échantillons de la partie haute de la marge et des âges éocènes pour les échantillons en aval. Bien que les âges thermochronologiques ne permettent pas de contraindre clairement le début de l'exhumation Cénozoïque, la distribution régionale de la longueur moyenne des traces de fission suggère un événement de refroidissement Cénozoïque.

Basé sur une approche intégrée de modélisation inverse et directe, nous proposons deux événements de refroidissement, le premier au Crétacé et le deuxième (de plus faible amplitude) au cours du Cénozoïque supérieur, correspondant à deux phases tectoniques. Le faible taux d'érosion, et la présence de dépôts crétacés au sommet du massif et dans le fond de la vallée du Rhône, ainsi que l'absence de déplacements de grande ampleur accommodés par des failles, suggèrent une flexure à grande longueur d'onde de la lithosphère, qui a produit une topographie de marge caractérisée par une large monoclinale avec un très faible gradient. Cette topographie est cohérente avec un soulèvement induit par des remontées mantelliques.

Mots-Clés : Massif Central, soulèvement Cénozoïque, thermochronologie.



Apport de la géophysique héliportée à la connaissance du sol et du sous-sol du nord de la Chaîne des Puys

Julien Bernard ¹, Clotilde Bertin ², Guillaume Martelet ¹, Anne Raingeard ¹,
Pierre-Alexandre Reninger ¹, Emilie Vanoudheusden ^{*2}

¹ BRGM Orléans – Direction des Géoressources

² BRGM Clermont-Ferrand

En octobre 2020, un levé héliporté, combinant, pour la première fois en France, trois méthodes géophysiques (électromagnétisme, magnétisme et gamma-spectrométrie), a été réalisé dans la partie Nord de la Chaîne des Puys. Ce dernier a été cofinancé par le Fonds Européen FEDER et le BRGM.

Ce levé pilote a couvert un terrain à la géologie contrastée, depuis la plaine sédimentaire du bassin de La Limagne au sommet volcanique du Puy de Dôme, survolant aussi le plateau du socle hercynien. Il offre des données géophysiques « d'infrastructure », qui permettent une visualisation du sous-sol en 3 dimensions, et ce, de la proche surface jusqu'à plusieurs centaines de mètres (voire kilomètre) de profondeur. Les mesures acquises apportent ainsi des contraintes et des éléments de compréhension novateurs sur la connaissance géologique, déclinée aux enjeux socio-économiques et environnementaux du territoire : la pression sur la ressource en eau, le potentiel géothermique, la prévention des glissements de terrain, du retrait-gonflement des argiles et des séismes, la pérennité des filières d'extraction de matériaux, l'élaboration d'outils pédagogiques...

Suite au levé, une première étude valorisant les données nouvellement acquises a été réalisée. Celle-ci avait pour objectif la caractérisation hydrogéologique du bassin d'alimentation de la galerie de Louchadière. Cette galerie sert à l'alimentation en eau potable pour le syndicat intercommunal Sioule et Bouble ; implantée sur la commune de Saint-Ours (63), la galerie, longue de 1626 m, traverse tour à tour du gneiss, du basalte, du granite, puis retrouve la base d'une coulée de basalte où se concentrent les écoulements d'eau souterraine captés par la galerie.

La meilleure connaissance du sous-sol permise par les données héliportées conduit à une interprétation novatrice sur l'origine de l'eau captée et à une meilleure description de la géométrie du paléorelief (ante volcanique) qui conditionne pour partie les écoulements souterrains.

Mots-Clés : géologie, géophysique, hydrogéologie, ressource en eau, volcanisme



T1.4 Volcanologie : Imagerie muon, sismologie ; dynamisme éruptif



Generation of water-rich lenses in the roof and walls of a shrinking magma chamber

Catherine Annen^{*1,2}, Alain Burgisser¹

¹Institut des Sciences de la Terre – ISTerre – France

²University of Bristol, United-Kingdom

We performed numerical simulations of the water release and transport within a solidifying magma body. At a pressure of 2 kbar, the bubbles formed by water exsolution within a crystal-poor liquid magma are small and their Stokes velocity is low. However, the exsolved water can rapidly rise where crystals form a solid network that deforms and channels the bubbles (Parmigiani et al, 2017. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 18, 2887–2905. doi.org/10.1002/2017GC006912). As a result, water is preferentially transported in the mush that surrounds the magma chamber. If the water is not transported further through capillary fracturing, water-rich lenses form atop the mush and get trapped in the solidifying walls and roof of the chamber as it cools and shrinks. The periodical release of the trapped water could explain bradyseismic crisis and cycles of volcano deformation. If present, water-rich lenses could be mistaken for melt on seismic or electrical tomography of magmatic systems and lead to an overestimation of the chamber size. High proportions of water result in the fragmentation and fluidization of the rock even at low melt fraction. We speculate that it could help the formation of schlierens observed in granites. If the chamber fails and erupts, the entrainment by the magma of the water-rich, melt-poor material could explain why many erupted products are crystal-rich and why antecrysts are so common.

Mots-Clés : magma chamber, mush, water, bubbles.



Volcanic deposits: an archive of nitrogen fixation by volcanic lightning at geological timescale

Adeline Aroskay^{*1} Erwan Martin¹, Slimane Bekki², Sophie Szopa³, Jean-Luc Le Pennec⁴, Joël Savarino⁵

¹ Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP), Sorbonne Université, France

² Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales (LATMOS), SU/UVSQ, France

³ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), Université Paris-Saclay, France

⁴ Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Quito, Equateur

⁵ Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), Grenoble, France

Nitrogen (N) is a crucial element for life on Earth. However, almost all the readily accessible N is trapped in the form of the very stable atmospheric dinitrogen, N₂, which must be converted into biologically available forms (so called fixed N; e.g. ammonia, nitrates, nitrites) in order to be metabolised by living organisms. Nowadays, nearly all the N fixation is achieved through biological and anthropogenic processes (Ciais & Sabine, 2013; Fowler et al., 2013).

Though marginal in the present-day atmosphere, N fixation must have proceeded through natural abiotic processes on the early Earth. One of the most invoked natural abiotic sources is lightning discharges, notably those associated with volcanic activity (Navarro-Gonzalez & Segura, 2005; Navarro-Gonzalez et al., 1998). However, so far, no field evidence of substantial N fixation in volcanic records has been found.

Here we report for the first time on measurements of large levels of nitrates strongly correlated with sulphate and chlorine levels in massive Neogene volcanic deposits, in arid to semi-arid environments. The multi-isotopic composition of those nitrates, in particular the high $\Delta^{17}\text{O}$ signatures, demonstrates that a large part of the nitrate forms in the atmosphere, and does not originate from anthropogenic sources, biological sources, or even magmatic emissions. In addition, the slight correlation between the $\Delta^{17}\text{O}$ of nitrate and $\Delta^{17}\text{O}$ of sulphate confirms that nitrates are linked to large volcanic eruptions. These volcanic nitrates most likely result from the oxidation of nitrogen oxides formed by volcanic lightning during intense explosive eruptions. Our preliminary estimations show that during a large caldera-forming eruption (volcanic explosivity index (VEI) about 7) up to about 300 Tg of N could be fixed by this mechanism. Our findings represent a unique evidence of the key role potentially played by volcanic lightning in N fixation during geological times, especially on the early Earth when volcanic activity was much more intense.

Keywords: isotopes, oxygen, nitrogen, volcanic lightning, nitrates, nitrogen fixation

References

- Ciais, P., & Sabine, C. (2013). *Carbon and Other Biogeochemical Cycles. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.015>
- Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M. A., Cape, J. N., Reis, S., ... Voss, M. (2013). The global nitrogen cycle in the Twentyfirst century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1621). <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0164>
- Navarro-Gonzalez, R., & Segura, A. (2005). *The Possible Role of Volcanic Lightning in Chemical Evolution.* <https://doi.org/10.1007/1-4020-2522-X>
- Navarro-Gonzalez, Rafael, Molina, M. J., & Molina, L. T. (1998). Nitrogen fixation by volcanic lightning in the early Earth. *Geophysical Research Letters*, 25(16), 3123–3126.



Etude expérimentale des tsunamis générés par les écoulements pyroclastiques

Alexis Bougouin *, Raphaël Paris, Olivier Roche

Université Clermont Auvergne, CNRS, IRD, OPGC, Laboratoire Magmas et Volcans, F-63000, Clermont-Ferrand, France

La plupart des tsunamis sont déclenchés par des séismes sous-marins, et les systèmes de prévention sont donc développés par rapport à cet aléa. Pourtant, d'autres mécanismes (météorite, glissement de terrain, vêlage des glaciers, éruption volcanique) peuvent également déclencher des tsunamis rendant les populations côtières particulièrement vulnérables lors de ces événements. Lors d'éruptions volcaniques explosives, l'entrée d'écoulements pyroclastiques dans la mer représente une source majeure de déclenchement de tsunamis de grande amplitude. Pourtant, les processus physiques contrôlant la génération de ces tsunamis volcaniques restent encore mal compris.

Afin de mieux comprendre ces tsunamis, des expériences en laboratoire d'écoulements granulaires fluidisés impactant l'eau ont été réalisées dans un canal de $7 \times 0.8 \times 0.2 \text{ m}^3$ au Laboratoire Magmas et Volcans. L'originalité de ces expériences réside dans le processus de fluidisation de l'écoulement granulaire permettant une similitude dynamique avec les écoulements pyroclastiques naturels (pression de pore du gaz interstitiel, grande mobilité de l'écoulement). Qualitativement, l'impact de l'écoulement granulaire dans l'eau génère (i) un jet vertical de grains, puis (ii) une vague de grande amplitude, et (iii) un courant de turbidité subaquatique. Proche de la zone d'impact, les caractéristiques de la vague sont principalement contrôlées par le débit massique et le volume de l'écoulement granulaire, alors que la hauteur d'eau maximale dans le chenal peut être ignorée. La taille des grains peut aussi affecter l'amplitude des vagues car elle contrôle en partie la capacité de l'eau à pénétrer dans le milieu granulaire poreux. A très faible taille de grains ($d \approx 65 \mu\text{m}$), l'amplitude de la vague devient équivalente à celle d'une vague générée par un écoulement d'eau, pour les mêmes conditions d'écoulement. Ces résultats confirment que les écoulements pyroclastiques chargés en cendres fines sont prédisposés à générer des tsunamis de grande amplitude.

Mots-Clés : écoulement granulaire fluidisé, tsunami, écoulement pyroclastique



Détermination expérimentale de l'évolution de la porosité dans un liquide silicaté riche en bulles et en cristaux en déformation cisailante

Camille Daffos^{*1}, Caroline Martel¹, Laurent Arbaret¹, Rémi Champallier¹, Jacques Précigout¹

¹ Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO), Université d'Orléans-CNRS/INSU-BRGM, UMR 7327, 45071, Orléans, France

Les volcans de magmas riches en silice peuvent présenter deux types de dynamisme éruptif : effusif (croissance de dôme de lave) ou explosif (éruptions vulcaniennes et pliniennes), selon leur capacité à relâcher ou à conserver leurs gaz, i.e., à développer une perméabilité magmatique plus ou moins connectée. Par conséquent, la compréhension de ces dynamismes est cruciale pour l'évaluation de l'aléa et des risques volcaniques. Le seuil de percolation des gaz dans un magma est principalement contrôlé par des paramètres intrinsèques, tels que la fraction de bulles et de cristaux et la viscosité du magma ; mais aussi par des paramètres extrinsèques tels que la vitesse d'ascension et de déformation du magma. L'objectif de ce projet est de mettre en évidence le rôle d'une charpente minérale sur le développement de la perméabilité d'un liquide riche en silice contenant des bulles de gaz, et ce en contexte de déformation magmatique.

Nous avons donc réalisé des expériences en torsion dans une presse de déformation à confinement gazeux de type Paterson. A partir d'un liquide haplogranitique (78.6 SiO₂, 12.5 Al₂O₃, 4.6 Na₂O, 4.2 K₂O en % massique) pré-hydraté (5 à 10 % massique de H₂O ; hydratation en autoclave à chauffage interne à 950°C et 400 MPa) et contenant des cristaux de plagioclase (0, 10, 30 et 50 vol% ; taille entre 50 et 90 µm), des bulles d'eau sont obtenues par décompression isotherme (850°C) de 300 à 50 MPa. Sans déformation, les analyses post-expériences (MEB et microtomographie RX) montrent que la fraction de bulles obtenue se situe entre 20 et 30 vol%, avec un diamètre moyen autour de 200 µm. Les expériences de torsion sont ensuite réalisées sur ces mêmes produits à 750°C et 50 MPa, dans la foulée de la décompression, selon une vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$) de 2×10^{-2} s⁻¹ et une quantité de déformation finie (γ) de 0 à 1.8.

L'étude de la connexion des bulles suggère que la percolation du gaz dans un magma riche en cristaux soumis à une déformation cisailante se développe par la mise en place de fractures et de chenaux de bulles, dépendant de la fraction de bulles, du réseau cristallin et de la déformation finie. Ainsi, les conditions de déformation, de teneur en cristaux et de viscosité pour lesquelles l'échantillon devient perméable aux gaz sont assimilées aux conditions de mise en place effusive du magma, par perte de ses gaz dans l'encaissant. Au contraire, les conditions ne permettant pas une connexion significative des bulles, les maintenant ainsi en surpression, sont susceptibles de générer des éruptions explosives.

Mots-Clés : Dynamisme éruptif, expérimentation, déformation, porosité,



Analytical solutions for surface displacements, magma overpressure and flow from a simple damage law using earthquake numbers: application to Piton de la Fournaise eruptions 2004-2018 – implications for eruption prediction

Jean-Luc Got^{1*}, Aline Peltier², Valérie Ferrazzini²

¹ISTerre/USMB, France

²OVPF/IPGP, France

Eruption prediction methods like FFM (Voight, 1988) often try to fit the pre-eruptive cumulative number of earthquakes to a simple analytical model inferred from the experimental study of damage during the rupture of metal bars in tension (Kachanov, 1958). This model is limited to the progressive rupture of cohesive bodies that have a finite size; this model does not take into account the complexity of the real rupture and often fails to fit the cumulative earthquake number recorded before an eruption. In this work we show that the use of a model for the cumulative earthquake number is not necessary and that this number can be used directly in a damage approach instead, without any model. We infer an analytical solution for surface displacements that allows fitting these data and compute magma overpressure and flow, for the recorded earthquake numbers. We apply these solutions to the earthquake and displacement data recorded for the 2004 to 2018 eruptions of Piton de la Fournaise, la Réunion, France. We show that computing Kachanov's continuity and effective stress, and strain power (Got et al., 2017) greatly helps to infer how the volcano is close to an eruption, even when seismicity and displacement data do not allow to conclude. The various pre-eruptive earthquake patterns are related to the physics of the rock deformation.

Mots-Clés : Georgia Taille 9



Le volcanisme explosif phonolitique quaternaire de Petite Terre (Mayotte) : dépôts et quantification de l'aléa volcanique

Tristan Lacombe^{*1}, Lucia Gurioli¹, Andrea DiMuro², Etienne Médard¹, Carole Berthod¹

¹ Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) – CNRS : UMR6524, IRD, OPGC, Université Clermont Auvergne – France

² Institut de Physique du Globe (IPGP), Sorbonne Paris-Cite, CNRS UMR-7154, Université Paris Diderot - France

Mayotte est une des quatre îles de l'archipel des Comores à l'entrée Nord du canal du Mozambique. Bien qu'âgée de 11 millions d'années, on y retrouve cependant des dépôts volcaniques phréatomagmatiques phonolitiques très jeunes (9 – 4 ka) notamment sur l'île de Petite Terre abritant la majorité des infrastructures nécessaire à la vie de Mayotte. La découverte en Mai 2019 d'un nouveau volcan sous-marin actif, 50 km au large de Mayotte, soulève la possibilité d'une reprise de l'activité à terre et par conséquent la nécessité de la quantification de l'aléa de ces éruptions passées.

Une caractérisation géomorphologique précise des différents édifices présents sur Petite Terre a été faite afin de préciser les relations entre ceux-ci. Un travail sur les dépôts (composition chimique, granulométrie, composants et caractérisation physique) permet de dresser un portrait précis de ceux-ci dans le but de décrire et reconstituer les scénarios éruptifs de ces éruption phréatomagmatiques.

L'analyse géomorphologique permet de montrer que 5 maars phonolitiques sont présents à Petite Terre couvrant des cônes de scories basanitiques plus anciens partiellement ou totalement. Leurs tailles supposent aussi une énergie proche de celle d'autres éruptions phréatomagmatiques connues (Taal, Ukinrek, Okmok) avec des VEI entre 3 et 4. Les dépôts pyroclastiques de chaque maar, bien que complexes à corréliser par leur proximité et leur compositions identiques portent bien les marques d'une implication de l'eau (lapilli accréionnés agrégats, plaquage humide, figures d'impact ductile) mais celle-ci semble varier en quantité durant chaque éruption au cours de différents trains de courant pyroclastiques. De même la fraction non-juvénile (composée de fragments de coraux et de basaltes) est minoritaire face à la fraction juvénile qui elle-même présente une diversité de clastes (ponces, juvéniles dense et obsidienne) suggérant une interaction eau/magma et une fragmentation plutôt superficielle ainsi qu'une fragmentation complexe.

Mots-Clés : Volcanisme ; Mayotte ; maars ; phréatomagmatisme ; phonolites



Conditions d'ascension des magmas de l'éruption sub-Plinienne de 1530 AD à la Soufrière de Guadeloupe

Caroline Martel ^{*1}, Michel Pichavant ¹, Hélène Balcone-Boissard ², Georges Boudon ³

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

² ISTE - Sorbonne Université, CNRS, UMR 7193, 75005, Paris, France

³ Université de Paris, Institut de physique du globe de Paris (IPGP), CNRS, F-75005 Paris, France

De nouvelles données sur les matrices (microlites, verres résiduels et bulles) de ponces, scories et lithiques émis au cours de l'éruption andésitique de 1530 AD de la Soufrière de Guadeloupe ont permis de proposer un modèle de dynamique éruptive pour ce dernier événement magmatique du volcan. Les données concernent les assemblages de phases, compositions chimiques, proportions et densités numériques des microlites, les compositions et teneurs en H₂O des verres résiduels, ainsi que les vésicularités des matrices. Ces données analytiques et texturales ont été combinées à des données expérimentales publiées d'équilibres de phases et de décompression afin d'estimer les profondeurs de cristallisation et les vitesses d'ascension des magmas.

Les résultats montrent que les produits émis contiennent entre 5 et 40 vol% de microlites qui ont majoritairement nucléé dans le réservoir magmatique en réponse à l'intrusion d'un magma plus mafique. Deux échantillons seulement ont nucléé des microlites par décompression lors de l'ascension du magma dans le conduit volcanique. La séquence éruptive de 1530 AD a débuté par des explosions phréatomagmatiques impliquant des magmas qui ont transité en un mois environ (vitesse de décompression de ~0.2 MPa/h) des parties les plus froides du réservoir (~825 °C et un liquide silicaté en équilibre avec les phénocristaux du réservoir contenant 74 pds% SiO₂) jusqu'à la surface. Ces magmas ont eu le temps de cristalliser en continu des microlites (~25 vol% de plagioclase, orthopyroxène, clinopyroxène, magnétite, quartz et apatite), mais ils n'ont pas perdu leurs gaz, probablement en raison d'un conduit aux parois encore hermétiques. La déstabilisation de flanc qui a suivi cette phase phréatomagmatique a probablement déclenché l'éruption sub-Plinienne qui a progressivement échantillonné les parties plus chaudes du réservoir principal (~875 °C et un liquide silicaté interstitiel contenant 71 wt% SiO₂), émettant des ponces rubanées et homogènes. Les ponces rubanées n'ont pas significativement perdu leur gaz et manquent de microlites générés par la décompression, ce qui suggère des temps d'ascension assez courts, de l'ordre de 0.5-1 jour (vitesse de décompression de 5-15 MPa/h). La phase strombolienne qui a suivi a produit des scories noires qui ont peu perdu de gaz et ont peu cristallisé de microlites syn-éruptifs, suggérant des vitesses d'ascension de l'ordre de 2 jours (vitesse de décompression de ~2 MPa/h). Le dôme terminal est totalement dégazé, suggérant des magmas montés en plus d'un mois, permettant une cristallisation à l'équilibre des microlites (~40 vol% de plagioclase, orthopyroxène, clinopyroxène, magnétite et cristobalite).

En ce qui concerne les futures éruptions de la Soufrière, la détection de toute intrusion magmatique à faible profondeur est susceptible d'activer un processus favorable à la déstabilisation de flanc, avec des possibilités de dépressurisation du magma sous-jacent, suivant un scénario similaire à celui de 1530 AD.

Mots-Clés : dégazage ; microlite ; liquide rhyolitique ; vitesse d'ascension ; sub-Plinien



Changement du dynamisme strombolien au phréatomagmatique de l'activité basaltique plio-quaternaire du volcan de Sidi Ben Adda, (Oranie nord-occidentale, Aïn Témouchent, Algérie)

Louise Ould Slimane¹ et Mohammed Tabeliouna²

- 1 Laboratoire Géoressources, Environnement et Risques Naturels (GEOREN), Université d'Oran², Algérie.
- 2 Laboratoire Géoressources, Environnement et Risques Naturels (GEOREN), Université d'Oran², Algérie.

Le massif volcanique d'Aïn Témouchent a été le siège d'importantes manifestations volcaniques de nature alcaline d'âge plio-quaternaire. Il est constitué par une vingtaine d'appareils volcaniques qui malgré l'érosion, ont pu garder leur morphologie originelle (cuvettes ou dayas, dômes ou maars).

Le volcan de Sidi Ben Adda est situé dans la partie septentrionale du massif, il est caractérisé par un maar de 1,8 km. Il est totalement détruit par une ultime explosion responsable de la mise en place d'épais dépôt pyroclastique constituée par une lithologie polygénique présentant un caractère phréatomagmatique. Cette formation s'est déposée sur trois coulées basaltiques, (basalte à olivine, basalte à pyroxène et basalte aphanitique). Le pourtour de cette structure est marqué par un anneau de tuf assez important où des figures du dynamisme phréatomagmatique sont visibles, tels que les antidunes et les figures d'impact (blocs fichés). Cependant, cette éruption phréatomagmatique provient de la rencontre d'un magma basaltique et d'une nappe phréatique ou d'un bras de mer. Ces éruptions ont un indice d'explosivité très important, et pourraient être qualifiées de « grises » même si le magma est basaltique, car le contact de l'eau refroidit assez fortement la lave, ainsi une succession d'explosions très violentes a découpé le cratère en structure circulaire appelée « maars ». Les projections (tephras = cendres, lapillis, bombes) s'accumulent à la périphérie du cratère. Les produits éjectés tels que de gros blocs de laves, ou des fragments du substratum (souvent gréseux) sont retombés sur ces dépôts non consolidés. Ils se sont alors enfoncés en "tordant" ou en "perçant" ces couches de lapilli, en donnant de véritables figures d'impact.

Cet appareil volcanique a fonctionné dans un premier temps en émettant des coulées basaltiques associées à des pyroclastites traduisant un régime strombolien, où la forte concentration des dépôts dans son environnement immédiat marqué par l'augmentation de la taille des bombes et des lapillis suggèrent que ce cratère est la source de la formation. L'ultime phase explosive serait associée à un ou plusieurs niveaux phréatiques responsables de la mise en place du régime phréatomagmatique du volcan.

L'originalité du volcan de Sidi Ben Adda est l'occurrence d'une phase phréatomagmatique ausommet et en fin de construction d'un édifice strombolien. En effet, classiquement, la phase phréatomagmatique se produit au tout début d'une séquence éruptive, au moment où le premier magma ascendant rencontre l'eau près de la surface.



Mots clés : Oranie, Aïn Témouchent, strombolien, phréatomagmatisme, basalte, pyroclastites.



Insights into the pre-eruptive spatiotemporal magmadynamic of the last eruption of Kizimen (Kamchatka)

Léa Ostorero ^{*1}, Georges Boudon ¹, Hélène Balcone-Boissard ²,

¹ Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), CNRS, Université de Paris, Paris, France

² ISTE, UMR 7193, CNRS-Sorbonne Université, 4 place Jussieu, Paris, France

The eruptions of arc volcanoes are often highly variable in terms of eruption style, recurrence, petrology, and the chemical composition of the magmas involved. The evolution of volcanic activity can take place over long periods of time, for example during the evolution of the magma in the so-called "magma mush" zone, (mainly composed of crystals but also liquid and volatile elements. distributed heterogeneously in space and time during the resting period of the volcano. This evolution is mainly recorded by petrology and the compositions of the eruptive products or short times (months to seconds) during unrest and eruption detected by monitoring signals or mineral reactions, vesiculation. The association of monitoring signals with detailed petrological studies can therefore be considered to interpret the active magmatic systems of arc volcanoes.

The Kizimen volcano (Kamchatka) studied here experienced its last historical magmatic eruption in 2010-2013, with 0.4 km³ DRE (Dense Rock Equivalent) of magma with the extrusion of a lava dome that gradually formed a very thick lava flow. A rapid mixing of different magmas in a probably stratified reservoir would be at the origin of the eruption that started in November 2010 ejecting a badly mixed magma attested by the abundance of andesites and banded dacites.

We propose here the first elements on the spatial and temporal dynamics of the magma before this eruption, which has the advantage of having been monitored by Russian monitoring systems, which will eventually allow to correlate the signals recorded by the monitoring networks with the petrological data. By the systematic analysis of the compositions of the orthopyroxenes (Crystal System Analysis approach) we constrain the pre-eruptive dynamics of the deep magmas, in particular the magma mixing. By the intracrystalline diffusion method (Fe-Mg in orthopyroxenes), the timescales of magma remobilization before eruption are constrained.

Mots-Clés : Magma mixing ; timescales, diffusion chronometry ; Kizimen (Kamchatka) ; Crystal System Analysis ; Orthopyroxenes



Relation entre le débit éruptif et la distance de parcours des écoulements pyroclastiques : analyse des données d'éruptions volcaniques explosives

Olivier Roche ^{*1}, Nourddine Azzaoui ², Arnaud Guillin ²

¹ Laboratoire Magmas et Volcans, Université Clermont Auvergne-CNRS-IRD, Clermont-Ferrand, France

² Laboratoire de Mathématiques Blaise Pascal, Université Clermont Auvergne-CNRS, Clermont-Ferrand, France

Les éruptions volcaniques explosives génèrent des panaches pliniens dont la hauteur augmente avec le débit éruptif. Dans de nombreux cas, les panaches s'effondrent pour former des écoulements pyroclastiques. Or, la relation entre la distance de parcours des écoulements et le débit éruptif demeure mal connue. Afin de traiter ce problème, nous avons analysé les données de 47 éruptions dont les volumes $V \sim 10^{-2} - 10^3 \text{ km}^3$, les débits $Q \sim 10^7 - 10^{12} \text{ kg/s}$ et les distances de parcours des écoulements $R \sim 3 - 185 \text{ km}$ varient sur plusieurs ordres de grandeurs. Une analyse montre que les débits estimés à partir de modèles d'écoulement sont en moyenne 13.8 fois supérieurs à ceux estimés pour la phase plinienne à partir de la hauteur des panaches, ce qui peut être causé par un élargissement du conduit et/ou le début de formation d'une caldera. Nous avons ensuite calculé des débits moyens, en tenant en compte des valeurs corrigées pour la phase plinienne, dans le but de quantifier la relation entre le débit éruptif et la distance de parcours des écoulements pyroclastiques. Les résultats montrent deux lois puissance distinctes qui indiquent que R augmente selon $Q^{0.47}$ pour les écoulements dilués turbulents et selon $Q^{0.37}$ pour les écoulements gaz-particules concentrés surmontés d'un nuage dilué. Ainsi, à débit éruptif donné, les écoulements dilués sont plus mobiles que les écoulements concentrés, mais les écoulements concentrés associés aux plus forts débits ont les plus grandes distances de parcours $> 100 \text{ km}$. De plus, pour les écoulements dilués R varie selon $(Q/w)^{0.48}$, avec w la vitesse de chute des particules, en accord avec la loi théorique $R \sim (Q/w)^{0.5}$. Notre analyse suggère que le débit éruptif contrôle la distance de parcours des écoulements pyroclastiques. Les lois puissance identifiées peuvent être utilisées pour déduire, à partir de la distance de parcours des écoulements, le débit d'une éruption lorsque celui n'est pas connu, ce qui est souvent le cas en absence d'une phase plinienne.

Mots-Clés : volcanisme explosif, débit éruptif, écoulement pyroclastique, distance de parcours



L'éruption sur la péninsule de Reykjanes, Islande, directement alimentée par la fonte de l'asthénosphère

Olgeir Sigmarsson ^{*1,2}, Sæmundur Ari Halldórsson ², Eniko Bali ²,
Jóhann Gunnarsson Robin ², Alberto Caracciolo ², Guðmundur H. Guðfinnsson ²

¹ LMV, CNRS, Université Clermont Auvergne -
France2 Institute of Earth Sciences, University
of Iceland

Les failles transformantes qui connectent les dorsales médio-océaniques sont parfois composées de centres de rift (« intra-transform spreading centres », ITSC) entre les segments de failles plus courtes, où les éruptions magmatiques ont lieux. Les éruptions sous-marines surces « leaky-transform faults » (LTF) produisent des basaltes primitifs plus riches en MgO que les MORB (basaltes des dorsales océaniques). Contrairement aux MORB, le magma émis sur les LTF provient probablement directement de l'asthénosphère sans séjour dans la croûte lors de son transfert vers la surface. La péninsule de Reykjanes, SO Islande, est un exemple au-dessus de la mer d'une LTF où une éruption est associée à l'écartement de deux plaques tectoniques et un mouvement de cisaillement. L'éruption de l'ITSC de Fagradalsfjall, qui a débuté le 19 mars 2021 et produit des tholeiites à olivine avec MgO proche de 10%, est la première éruption depuis six siècles sur la péninsule. Les macrocristaux (<5% par volume) les plus primitifs sont le spinelle chromifère, l'olivine (Fo₈₉), le plagioclase (An₈₉) et le clinopyroxène (Mg# : 88) riche en Cr. Leur composition témoigne de l'origine profonde du magma, voire asthénosphérique. Les géo-baromètres suggèrent l'équilibration vers 20 km à la limite manteau-croûte. Le flux de magma est resté très faible autour de 10 m³/sec, selon les études de l'Institut des Sciences de la Terre de l'Université d'Islande. Néanmoins, la composition des basaltes est devenue plus riche en MgO et K₂O avec le temps, mais plus pauvre en SiO₂ et Na₂O. Le rapport de La/Yb a augmenté d'un facteur trois et les rapports des isotopes sont devenus plus radiogéniques. Ces variations compositionnelles reflètent l'éruption du liquide issu de la fusion du manteau appauvri (lherzolite à spinelle) avant l'extraction d'un liquide provenant d'un manteau enrichi et plus profond. Les variations des rapports des éléments en trace et des isotopes illustrent le mélange binaire entre un composant de la ride de Reykjanes au large de la péninsule et d'un composant plus enrichi du panache mantélique d'Islande et confirment ainsi l'effet de Schilling (interaction d'un panache mantélique avec un ride médio-océanique) au sein d'une seule éruption.



Comment décrire les éruptions volcaniques par la thermodynamique phénoménologique ?

Régis Thiéry ^{*1}

¹ Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) – CNRS : UMR 6524 - Université Clermont Auvergne - France

Les mécanismes des éruptions volcaniques font l'objet de nombreuses modélisations détaillées de thermodynamique statistique et de cinétique, mais il manque encore une description thermodynamique globale des processus énergétiques permettant d'expliquer le caractère explosif de ces éruptions dans ses grandes lignes.

Cette contribution vise à apporter une première réponse à partir de diagrammes thermodynamiques de systèmes simples comme le système H_2O , le système H_2O-CO_2 , le système $NaCl-H_2O$ ou les système silicates- H_2O .

Ainsi, il est proposé qu'une grande partie des éruptions volcaniques peuvent être décrites par ces trois grandes étapes:

1. Décompression adiabatique brutale d'un système initialement à l'équilibre dans un réservoir sous pression et majoritairement sous forme liquide, par la propagation d'une onde de décompression. Cette détente étant trop rapide pour les processus de nucléation/croissance de bulles, le liquide se trouve alors dans un état de tension métastable, à même de réagir par cavitation voire de s'approcher de la courbe spinodale d'uliquide, synonyme de déstabilisation très explosive du liquide sous forme de décomposition spinodale ;

2. Rebond de pression sous forme d'une onde de choc par un début d'exsolution des volatils et surtout par rééquilibrage adiabatique des potentiels chimiques entre le liquide et le gaz ;

3. Et enfin, détente adiabatique irréversible d'un mélange liquide + gaz (+solides) jusqu'à la pression externe de l'atmosphère ou de l'océan, et retour à l'équilibre.

Toutes ces étapes peuvent être calculées avec l'aide d'une équation d'état, et je présente les diagrammes thermodynamiques pression versus température, potentiel chimique versus pression, et énergie explosive versus température/pression afin d'illustrer les différentes facettes du phénomène volcanique de ce point de vue thermodynamique.

Ce modèle s'applique aussi bien aux éruptions phréato-magmatiques produites par les volcans de type maar-diatrème qu'aux éruptions pliniennes impliquant des magmas acides visqueux. Le modèle est étendu au cas des effets de surpression produits par un choc thermique sur de l'eau froide au contact d'un magma ou par la cristallisation de cristaux anhydres lors du refroidissement d'un magma dans une chambre magmatique.

L'intérêt de cette approche méthodologique est aussi de déconstruire les biais cognitifs largement propagés dans l'enseignement au niveau collèges/lycées et par la vulgarisation du volcanisme auprès du grand public, comme, par exemple sur le rôle exagéré attribué aux surpressions des bulles de gaz dans un magma visqueux, ou sur l'ébullition en système clos, qui est souvent mal comprise.

Mots-Clés : Thermodynamique, volcanisme, fluides, ébullition, métastabilité, explosivité



Evidence for an active, transcrustal magma system in the last 60 ka and eruptive degassing budget (H₂O, CO₂, S, F, Cl, Br): The case of Dominica

Thiébaud d'Augustin^{*1}, Hélène Balcone-Boissard¹, Georges Boudon²,
Caroline Martel³, Etienne Deloule⁴, Pierre Bürckel²

¹ISTeP, UMR 7193, CNRS-Sorbonne Université, 4 place Jussieu, Paris, France

²Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), CNRS, Université de Paris, Paris, France

³Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO), UMR 7327, Université d'Orléans-CNRS/INSU- BRGM, France

⁴CRPG, UMR 5873 CNRS-Université de Lorraine, BP20, 54501 Vandoeuvre les Nancy, France

The Morne Trois Pitons-Micotrin volcanic complex on the island of Dominica (Lesser Antilles) emitted a series of plinian eruptions between 18 ka and 9 ka BP.

We studied it to constrain magma storage conditions and volatile degassing balances, by comparison with the three previous ignimbritic eruptions (~60-24 ka BP). Volatile concentrations in glass inclusions and mineral-melt thermobarometry indicate storage at

≤200 MPa (~6-8 km) and 860-880°C. The magmas feeding these plinian eruptions were stored at a shallower depth than those that older ignimbritic eruptions from the same volcanic complex (~16 km). Close magma composition and similar halogen ratios, however, suggest a common source for the magmas feeding both the plinian and the ignimbritic eruptions. The large eruptive fluxes of F, Cl and Br to the atmosphere (up to 1.4-2.8 x 10⁻¹ Mt/km³, 1.5-4.0 Mt/km³ and 2-4 x 10⁻² Mt/km³, respectively), estimated by the petrological method, support the potentially important role of volcanic halogens in modifying the chemistry of the atmosphere. The behaviour of S, potentially partitioned in a fluid phase, prevents here the calculation of an eruptive outgassing budget.

Mots-Clés : Transcrustal magma system, eruptive degassing, halogens, Dominica, Lesser Antilles arc



T1.5 Pluton emplacement vs tectonic setting



Plastic deformation of plagioclase in a gabbro pluton accreted at a slow-spreading ridge (Hole U1473A, Atlantis Bank, Southwest Indian ridge)

Maël Allard *, Benoît Ildefonse, Émilien Oliot, Fabrice Barou

Géosciences Montpellier, Université de Montpellier, CNRS - France

The crustal architecture of slow-spread ocean crust results from complex interactions between magmatism, tectonics and hydrothermalism. IODP Hole U1473A (789m depth) was drilled at the summit of the Atlantis Bank, a gabbroic massif exhumed at the Southwest Indian Ridge (SWIR), during IODP Expedition 360. In this study, we have used 115 samples to identify and quantify plagioclase plastic deformation processes in these oceanic gabbros from the SWIR.

We describe deformed zones using petrographic observations made along the core. Ductile deformation is widespread and is sometimes strongly localized. It initiated during accretion under magmatic conditions and continued until late brittle conditions. Porphyroclastic microstructures testify for post-magmatic, solid-state, high-temperature (HT) pervasive deformation. Plagioclase represents >50% of rock's volume and is the dominant phase accommodating HT deformation in the gabbro. It shows strong dynamic recrystallization, forming a fine-grained matrix. Strain localization, expressed by mylonitic and ultramylonitic zones, is often overprinted by deformation at decreasing temperatures.

Electron Backscattered Diffraction (EBSD) analyses of plagioclase reveal a weak crystallographic preferred orientations (CPO), first developed during early magmatic flow that has developed a primary fabric with a (010) foliation plane and a [100] lineation axis. This CPO is persistent during subsequent plastic deformation and strain localization, and is observed in almost all samples. A detailed investigation of internal misorientations measured at plagioclase subgrain boundaries indicates the activity of at least 5 slip systems: [100](010), [001](010), [100](001), $\frac{1}{2}$ [110](001), and $\frac{1}{2}$ [$\bar{1}0$](001). The calculated CPO strength increases from slightly foliated samples to mylonites before decreasing significantly in ultramylonites, which could be explained by orientation scattering after subgrain rotation and grain boundary processes.

Mots-Clés: Gabbros ; Plagioclase ; Deformation ; EBSD ; Atlantis Bank ; Mid-Ocean Ridge.



High-temperature deformation and retrograde strain localization during cooling and exhumation of a gabbroic pluton in an Oceanic Core Complex (Hole U1473A, Atlantis Bank, Southwest Indian ridge)

E Maël Allard¹, Émilien Oliot¹, Pierre Lanari², Benoît

Ildefonse¹¹ Géosciences Montpellier, Université de Montpellier, CNRS – France

² Institute of Geological Sciences, University of Bern – Switzerland

The crustal architecture of slow-spread ocean crust results from complex interactions between magmatism, tectonics and hydrothermalism. IODP Hole U1473A (789m depth) was drilled at the summit of the Atlantis Bank, a gabbroic massif exhumed at the Southwest Indian Ridge (SWIR), during IODP Expedition 360. From 6 samples, we conducted petrologic and petrographic studies of deformed gabbroic lithologies from the SWIR involving quantitative compositional mapping, complemented by thermodynamic investigations of deformation conditions (Pressure-Temperature-H₂O fluid) and EBSD analyses of all constitutive minerals.

High-temperature (HT) deformation is widespread in the gabbro and produced numerous plurimeter-scale sections of porphyroclastic microstructure, which are heterogeneously cross-cut by multiscale shear zones. A first episode of strain localization occurred in very similar conditions than that of porphyroclastic microstructure formation, as showed by limited chemical variations in the constituting phases (plagioclase, pyroxenes, olivine and amphibole). It is characterized by a grain size reduction, a slight increase of amphibole content, and a decrease of crystallographic preferred orientations strength fabric of all phases(except amphibole). A second episode of strain localization is marked by thinner centimeter scale shear zones, associated with fluid circulation promoting crystallization of up to 60 vol% retrograde amphiboles.

Thermodynamic modeling (using Perple_X) indicates granulitic condition for the first episode of HT deformation that led to the formation of porphyroclastic microstructures (860-880°C / 1.2-1.7 kbar). The second deformation episode occurred under upper amphibolite conditions (650-700°C / <1.5 kbar). These thermal and microstructural evolutions are consistent with deformation which was associated with the exhumation of the gabbro pluton now forming the Atlantis Bank. The results confirm an early onset of deformation under near-solidus conditions.

Mots-Clés: Gabbros ; Deformation ; XMapTool ; Perple_X ; Atlantis Bank ; Mid-Ocean Ridge.



Granite varisque du Ment (massif du Maroc central) contexte de mise en place en sub-surface: Témoins pétrologiques et structuraux

Abdelkarim Ait Baha ¹, Isma Amri ^{*1}, Khalil El Kadiri ¹, Muhammad Ouabid ², Adnan Tobi ³

¹ Laboratoire de Géologie de l'Environnement et Ressources Naturelles (GERN) – Faculté des Sciences Tétouan, Université Abdelmalek Essâdi – Maroc

² Geology & Sustainable Mining, Université Polytechnique Mohammed VI, 43150 Benguerir – Maroc

³ Laboratoire de Géologie Appliquée, Faculté des Sciences et de Technologie, Université Moulay Ismaïl Errachidia - Maroc

La Méséta marocaine dérive d'une zone mobile paléozoïque bordant par le nord la plateforme saharienne (Anti-Atlas). Elle est déformée successivement par le paroxysme éovarisque fini-dévonien (Méséta orientale), intra-viséen (Méséta centre-orientale), et westphalien (Méséta centre-occidentale). C'est à la fin de cette évolution que des plutons granitiques sont mis en place dans la Méséta centre-occidentale. Cette zone est marquée essentiellement, par une activité magmatique hercynienne, mettant en place les granites de Zaer, Oulmès et Ment. La mise à l'affleurement de ces plutons acides est attribuée classiquement à l'érosion d'une couverture alpine éventuelle, ainsi que de son substratum immédiat supra-plutonique. Mais, l'existence de conglomérats molassiques fini-carbonifères et permien, montrent que l'essentiel de cette érosion avait eu lieu seulement à la fin du carbonifère et au début du Permien.

Dans le granite permien (279 Ma), nous mettons en évidence : **i)** sur son pourtour, la configuration de la schistosité, et ce, par rapport aux cisaillements associés, **ii)** au sein du massif, le champ de contraintes déterminant joints et linéaments, puis, et pour la première fois **iii)** l'existence de filons hectométriques andésitiques à rhyolitiques, tous en contact diffus au sein du granite. Les données acquises témoignent de façon nouvelle d'un volcanisme syn-plutonique. De fait, il devient possible d'opter pour une mise en place du granite étudié, en contexte de sub-surface, ce qui dispense en même temps, de l'érosion trop rapide, sus-citée, dans le court intervalle fin Permien-Trias inférieur. Ce résultat répercute secondairement une conséquence sur la profondeur des minéralisations associées (Au, Ag, Pb, Cu, Zn, W et Sn). Enfin, et sur le plan géodynamique, il est important de signaler, que notre résultat est conforme à la structure profonde de la Méséta, à l'image de la « subduction » à vergence Est de la plaque du Môle côtier sous la Méséta centrale.

Mots-Clés : Orogenèse Varisque, Granite du Ment, filons andésitiques, Erosion, Minéralisations (Au, Ag, Pb, Cu, Zn, W, Sn), subduction



Pegmatite emplacement and regional deformation: the Variscan Cap de Creus pegmatite field (Eastern Pyrenees)

St Blanquat M. (de)¹ *, Serrano J.¹, Van Lichtervelde M.¹, Gumiaux Ch², Proietti A.³,
Druguet E.⁴, Vanderhaeghe Olivier¹

1: Géosciences Environnement Toulouse, Université de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS, (Toulouse), 14 avenue Edouard Belin, 31400, France.

2: Université d'Orléans, CNRS, ISTO, BRGM, UMR 7327, 1A rue de la Férollerie, 45071 Orléans, France.

3: Centre de microcaratérisation Raimond Castaing, Université de Toulouse, ECA, 3 rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse, France.

4: Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Barcelona, Spain

Granitic pegmatites are the products of extreme liquid differentiation that concentrates incompatible elements (rare metals, alkali and fluxes P, B, F, Li, etc) either by low degree of partial melting ('first-drop') or by high degree of fractional crystallization ('last-drop'). The Cap de Creus area is a strategic zone to investigate pegmatite-hosted rare-element 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 hundreds of bodies that display a gradient of differentiation correlated with the metamorphic grade and the finite strain rate of the country rocks.

The results of our field, structural, textural and petrological studies show that: 1/ Pegmatites were emplaced over several million years during most of the main Variscan regional deformation event (D2), with a duration of several million years. 2/ At first order, the oldest pegmatites, emplaced at the onset of D2, are the most evolved ones whereas pegmatites emplaced during middle to late D2 are generally less evolved. 3/ In the anatectic area, field relationships show a clear link between migmatite leucosomes and the least-evolved pegmatites at various scale, a feature already noticed by Druguet and Hutton (1998). 4/ Our mineralogical, structural and textural studies reveal significant discordance between the deduced diversity of Cap de Creus pegmatite types and the previously published four different pegmatite mineralogical types.

The progressive emplacement of pegmatites during D2, and thus potentially during a few Myrs, is hardly compatible with the evolution of pegmatitic magma by fractional crystallization of a standard peraluminous granite. Moreover, the fact that the youngest injected pegmatites are generally not the most evolved question the granitic 'last-drop' model. Our data consequently questions the petrological link between the different mineralogical groups of pegmatites, and particularly the model of their 'granitic' origin. This might seem as a paradox, but many differentiated pegmatites are apparently not genetically linked to the less differentiated ones. This does not preclude a common origin for all pegmatites by partial melting of the metapelites at different times and at different structural levels. Our study shows that a detailed structural analysis is necessary to constrain the relative chronology of pegmatite injection, and could give a critical template for petrogenetic model.



Mots-Clés : magma emplacement, regional deformation, pegmatite, mineralization



Tectonic significance of mafic-ultramafic intrusions in the Neoproterozoic Xixano Nappe Complex of northern Mozambique

David Evans ^{*1,2}, Carole Cordier ³, Paul Chikwanda ⁴, Nick Graham ⁴

¹ Carrog Consulting, France

² The Natural History Museum of London, Royaume Uni

³ Institut des Sciences de la Terre de Grenoble, France

⁴ Rockover Resources Ltd., Afrique du Sud

The Cabo Delgado Nappe Complex in northern Mozambique includes several distinct structural units that were overthrust and metamorphosed at upper amphibolite to granulite facies during the period 631 - 607 Ma. The Xixano Nappe Complex (XNC) is the largest of these units and is representative of the others. Recent geological mapping and geochemical surveying has shown that supracrustal rocks are dominant and are divided into three domains: Eastern and Western granulites (mafic and minor felsic); and Central marble, quartzite and graphitic gneiss. These are interpreted as mafic and felsic volcanic rocks and shallow to deeper water sediments.

Mafic-ultramafic intrusive rocks of the XNC are small to medium-sized differentiated bodies hosted within both metasedimentary and metavolcanic supracrustal rocks. They range from olivine cumulates (dunite, ilherzolite) to plagioclase-pyroxene(-olivine) cumulates (gabbro-norite, troctolite, anorthosite). Many of the smaller intrusions contain weak to moderate Ni-Cu sulphide mineralization of varying metal tenors (metal in 100% sulphides) and ratios, and some show visual evidence of wall-rock assimilation.

Five of the intrusions of the XNC have been studied in greater detail and show a variety of textures and characteristic minerals indicating their emplacement at both an early pre-tectonic and at a late tectonic stage. The pre-tectonic intrusions are only found in the metavolcanic terrane and are characterized by granular non-magmatic textures and the presence of green spinel and Na-Al rich pyroxenes. They are weakly mineralized with finely-disseminated sulphides. The late tectonic intrusions have largely preserved their primary magmatic textures and are characterized by a partial amphibolite to greenschist facies retrogressive overprint. Some of these intrusions contain Na-Al rich clinopyroxenes and amphiboles, suggesting emplacement at depth. Their geochemistry and style of mineralization suggests emplacement in a continental setting rather than in a juvenile arc setting.

Mots-Clés : Ni-Cu sulfide mineralization, mafic-ultramafic intrusion, Neoproterozoic, Xixano Complex, Mozambique



Strain analysis of syn-tectonic Late Variscan MME and host tonalites (Serre Batholith, Italy) by means of field- and UAV-survey

Eugenio Fazio ^{*1}, Patrizia Fiannacca ¹, Lorenzo Tomaselli ¹, Damiano Russo ¹,
Rosolino Cirrincione ¹, Manish A. Mamtani ²

¹ Department of Biological, Geological, Environmental Sciences, University of Catania, Italy

² Indian Institute of Technology, Kharagpur, West Bengal, India

This study focuses on syn-tectonic tonalites (c. 300 Ma) outcropping in the south-western part of the Serre Batholith (southern Italy) near the Palmi village (N 38°21'51"; E 15°50'18"). We used the shape of mafic microgranular enclaves (MME) hosted into tonalites to reconstruct the stress field orientation at the time of pluton emplacement. This strain analyses has been also coupled with the main orientation of felsic dykes, which sharply crosscut MME, collected by means of both field- and UAV-survey (drone model DJI-Mavic- 2Pro). The reconstruction of a 3D virtual outcrop model (Agisoft Metashape software) permitted us establishing the spatial orientation of strain markers (MME and dykes). On this basis, we reconstructed a maximum stress oriented N5°/25° (dip direction/dip) at the time of MME injection, which can be correlated to the activity of a late-Variscan shear zone in the crystalline basement of Calabria roughly E-W oriented in the currently geographic coordinates. Our findings contribute to a better reconstruction of late-Variscan tectonic framework in the Mediterranean realm characterized by a complex network of crustal scale shear zones.

Mots-Clés : Shear-zone, MME, syn-tectonic pluton emplacement, UAV-survey, 3D digital outcrop model, tonalite



Gradients thermiques et flux de chaleur au sommet du réservoir magmatique de l'ophiolite d'Oman - relation avec les événements hydrothermaux actifs

Christian Nicollet^{*1}, Lydéric

France²¹ Laboratoire Magmas et Volcans, Université Clermont

Auvergne - France

² Université de Lorraine, CNRS, CRPG, F-54000 Nancy, France

L'ophiolite d'Oman montre une coupe complète de lithosphère océanique générée au niveau d'une ride rapide. Dans la partie supérieure de la croûte, sous les basaltes en coussins, les dykes du complexe filonien s'enracinent dans les gabbros isotropes. Dans ces derniers, des contacts sécants gabbro dans gabbro matérialisent des nombreuses injections magmatiques successives. Ces nouvelles injections sont responsables du recuit des roches sus-jacentes, gabbros et base du complexe filonien préalablement hydrothermalisés. Sur quelques dizaines de mètres, les roches sont métamorphisées et présentent une texture de hornfels granoblastique à 2 pyroxènes ($\pm$ amphibole). Le gradient thermique apparent estimé de cette zone métamorphique est en moyenne de $3^{\circ}\text{C}/\text{m}$. Afin d'évaluer plus précisément l'évolution thermique de ce métamorphisme de contact, nous avons utilisé une modélisation numérique simple pour simuler le transfert de chaleur unidimensionnel d'une intrusion dans la roche hôte. L'intrusion d'un sill de 60-100 m d'épaisseur reproduit globalement le gradient thermique apparent mesuré. Plus précisément, il apparaît que celui-ci est très élevé au contact avec l'intrusion ($<10\text{m}$) atteignant plusieurs dizaines de $^{\circ}/\text{m}$ les premières années suivant l'intrusion. Il diminue très rapidement au-delà de cette distance et après quelques années. Cette zone correspond à une couche limite conductrice entre le système hydrothermal et le système magmatique. Dans cette zone restreinte, les flux de chaleur correspondant varient de 200 à $30\text{W}/\text{m}^2$ et sont similaires aux flux de chaleur estimés au niveau des fumeurs noirs actifs des dorsales rapides. Nos calculs montrent que la durée d'activité d'un fumeur noir serait de l'ordre de quelques années (en l'absence d'une réalimentation de la lentille magmatique). Cette activité brève des fumeurs noirs est cohérente avec la taille modeste des dépôts de VMS (sulfures massifs volcaniques) associés aux fumeurs noirs des dorsales rapides.

Mots-Clés : Ophiolite d'Oman, Gradients thermiques, flux de chaleur, événements hydrothermaux



Emplacement conditions and post-intrusive rotation of the Biella pluton, Sesia-Lanzo Zone, Austroalpine, Western Alps

Davide Zanoni ^{*1}, Luca Corti ¹, Manuel

Roda ¹¹ Dipartimento di Scienze della Terra 'A. Desio', Università degli Studi

di Milano - Italie

This work presents new microstructural data and thermobarometrical estimates to constrain the emplacement depth of the Ruppelian Biella pluton within the eclogitic internal Sesia- Lanzo Zone, western Austroalpine domain. This zone with the autochthon andesitic volcanoclastic cover is separated from the Southalpine Ivrea Zone by the western segment of the Periadriatic Line. By thermobarometry, 710 and 750°C, and 0.9 and 2.3 kbar are estimated for the final emplacement conditions and depths of 3 and 8.5 km are estimated for the shallower and deeper part, respectively. By 3D modeling, surface and volume distribution of emplacement pressures and temperatures are retrieved and isobaric surfaces are interpolated by means of Geomodeler software. The orientations of isobaric surfaces are consistent with a post-intrusive southeastward rotation of $69 \pm 5^\circ$ about an axis trending at N 35° and thus sub-parallel to the Periadriatic Line. These results confirm previous paleomagnetic studies on andesites and are consistent with part of the andesitic volcanics fed by the outer part of the Biella pluton and with an average original thickness of the pluton of

5.5 km. In the light of the updated emplacement conditions of the Biella pluton and recent fission track data from the literature, we suggest that: (i) the crustal section above the pluton roof consisted mostly of the andesite cover that is supposed to have reached a thickness of about 2.3 km; (ii) the andesite cover experimented a depositional and tectonic burial under temperatures that reset fission tracks in apatite and zircon after magma cooling; (iii) the tectonic burial was due to a southeastward rotation before 26 Ma; (iv) uplift by back-thrusting with ongoing rotation started during Chattian and Aquitanian times (24 - 19 Ma – zircon fission track ages in andesite); (v) the rotation lasted until Langhian and Serravalian times (16 - 12 Ma apatite fission tracks in pluton).

Mots-Clés : pluton emplacement, pluton 3D modeling, rigid block vertical rotation, crystallization isobaricsurfaces, Periadriatic magmatism, late-collisional magmatism



T1.6 Dynamique des bassins compressifs



Apports de l'inversion des stylolites sédimentaires dans la reconstruction de l'histoire de la compaction et de la déformation dans les bassins d'avant-pays : exemple de la chaîne Ombrie-Marche (Apennins, Italie)

Aurélie Labeur^{*1}, Nicolas E. Beaudoin¹, Olivier Lacombe², Guilhem Hoareau¹,
Christophe Pecheyran³, Lorenzo Petraccini⁴, Jean-Paul Callot¹

1. Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS, TOTAL, LFCR, Pau, France
2. Sorbonne Université, CNRS-INSU, Institut des Sciences de la Terre - ISTeP, Paris, France
3. Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, IPREM, Pau, France
4. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, Italy

Les premiers incréments de la déformation liée à la contraction dans les bassins d'avant-pays sont enregistrés par des réseaux de méso- et micro-structures (failles, fractures, stylolites). Nous présentons ici une méthode récente paléopiezométrique consistant en l'inversion de la rugosité des stylolites, figures de pression-dissolution fréquemment observées dans les roches carbonatées. La méthode est appliquée aux stylolites sédimentaires, *i.e.*, formés sous le poids de la colonne sédimentaire lors de l'enfouissement, et permet ainsi de reconstruire la profondeur des couches précédant les premières déformations générées par la contraction dans les bassins d'avant pays. En cela, les stylolites constituent des marqueurs d'enfouissement permettant de s'absoudre des habituelles contraintes méthodologiques, à savoir les gradients géothermiques passés. L'application de cette méthodologie à l'exemple de la chaîne Ombrie-Marche (Apennins, Italie), et notamment de la partie Ouest et des anticlinaux de San Vicino et Cingoli situés plus à l'Est, démontre la fiabilité et la robustesse de ce procédé d'inversion, les profondeurs d'enfouissement résultantes et contraintes associées concordant et complétant les données de datation absolues des fractures tectoniques (*e.g.*, U-Pb). En outre, le calendrier des déformations liées au plissement a été précisé pour chacune de ces structures plissées, le couplage de ces données paléopiezométriques avec les autres données de datation permettant de borner temporellement les grands stades de déformation : (i) le stade flexural, daté du Burdigalien au Serravalien dans la partie ouest (*ca.* 20-15 Ma), et du Burdigalien au Serravalien (*ca.* 21-6.3 Ma) dans le secteur Cingoli-San Vicino ; (ii) le raccourcissement parallèle aux couches est Serravalien à Tortonien (*ca.* 15-8 Ma) à l'Ouest, et est Messinien (*ca.* 6.3-5.8 Ma) pour les deux autres anticlinaux ; (iii) le plissement, Tortonien-Messinien (*ca.* 8-5.5 Ma) dans la zone occidentale, et Messinien à Plaisancien (*ca.* 5.8-3.9 Ma) à San Vicino-Cingoli ; (iv) et le stade de serrage tardif du pli, Messinien-Plaisancien (*ca.* 5.5-3 Ma) à l'Ouest, pour une initiation estimée au Plaisancien (*ca.* 3.9 Ma) dans la partie Est. Au-delà de l'apport régional à la compréhension du plissement dans un avant-pays, cette étude établit la technique d'inversion de la rugosité des stylolites comme un paléopiezomètre robuste permettant de reconstruire avec précision la séquence des déformations, difficilement accessibles par d'autres méthodes d'analyse.

Mots-Clés : déformation compressive, bassin d'avant pays, paléopiezométrie, stylolite, plissement, enfouissement.



Lithospheric transfer zones driving the non-cylindrical shape of the Pyrenean orogen (Mauléon hyperextended basin)

Cécile Allanic^{1*}, Nicolas Saspiturry², Philippe Razin², Thierry Baudin¹, Gabriel Courrioux¹, Benjamin Le Bayon¹, Benoit Issautier¹, Olivier Serrano¹ and Abdeltif Lahfid¹

¹ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

² ENSEGID – Institut polytechnique de Bordeaux - France

Despite Tertiary Pyrenean orogenesis, the Early Cretaceous Mauléon hyperextended basin remains preserved in the heart of a lithospheric pop-up structure. A multidisciplinary approach combining Raman spectroscopy of carbonaceous material, paleostress reconstructions, seismic interpretations and 3D implicit geological modeling yields evidence, from the outcrop to the lithospheric scale, for the presence of N20°-oriented transfer zones. The thrust segments of the N120°-oriented Lakhoura and North Pyrenean Frontal thrust systems, defining the edges of the Mauléon basin pop-up, branch into these transfer zones and define corridors with differing amounts of shortening. This overall structural pattern defines drawer-like structures allowing the closure, by stages, of the former rift domain. This concept can be applied at both the crustal and the lithospheric scale. This study clarifies the role of inherited lithospheric autochthonous transfer zones in the reactivation of a hyperextended rift basin and bears upon the origin of the non-cylindrical shape of the Pyrenean belt.

This work is part of the OROGEN project, cofunded by Total S.A., BRGM and Institut national de sciences de l'Univers (INSU).

Mots-Clés : Transfer zones; Rift inversion; non-cylindricity; Pyrenees; Mauléon basin



Histoire thermique de la partie septentrionale du bassin d'Aquitaine : mise en évidence d'un événement thermique au Crétacé inférieur

Jocelyn Barbarand^{*1}, Eric Lasseur², Claire Boukari¹, Charlotte Fillon³

¹ Université Paris Saclay - CNRS, GEOPS, Orsay 91405, France

² BRGM - 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans, France

³ TOTAL - Centre Scientifique et Technique Jean Fégér (CSTJF), France

La partie septentrionale du bassin d'Aquitaine est peu affectée par la dynamique pyrénéenne contrairement à sa partie méridionale (fossés du crétacé inférieur et bassin d'avant-pays de l'orogène pyrénéen) mais l'ensemble du bassin partage une discontinuité majeure correspondant à l'absence d'une grande partie du Crétacé inférieur. Cette absence peut être associée à une période de non-dépôt en relation avec l'ouverture de l'Atlantique Nord ou à une période d'érosion qui aurait supprimé la couverture crétacée lors d'un épisode reconnu à l'échelle de l'Europe. Pour tester ces deux hypothèses, une étude par thermochronologie traces de fission sur apatite a été menée sur des échantillons triasiques de forages répartis dans le bassin selon un profil EW (Saint Martin Labouval, Caubon, Pouillac, Clam, Le Porge) afin de définir leur paléoenfouissement et tester si la couverture actuelle est en accord avec les paléotempératures mesurées. Les âges traces de fission sur apatite obtenus sont compris entre 33 ± 4 et 115 ± 5 Ma pour des profondeurs d'échantillonnage comprises entre 540 et 2237 mètres et traduisent ainsi une empreinte thermique forte. Quelques longueurs de traces confinées ont pu être mesurées et varient entre ~ 11 et $12,5 \mu\text{m}$. Les paléotempératures maximales reconstituées sont de l'ordre de 90°C pour les forages, y compris celui de Saint Martin Labouval situé sur la bordure orientale du bassin ; ces températures maximales sont obtenues lors du Jurassique terminal ou du Crétacé inférieur. En considérant la couverture présente actuellement pour chaque échantillon, les paléogradients mesurés varient entre 47 et 130°C . La prise en compte d'un gradient plus conventionnel ($30\text{-}40^\circ\text{C}/\text{km}$) impose de considérer le dépôt d'une couverture plus épaisse, essentiellement du Crétacé inférieur avant son érosion à la fin du Crétacé inférieur et lors du Crétacé supérieur. Ces différentes hypothèses seront discutées et replacées dans le contexte de l'Europe de l'Ouest lors de la période Jurassique – Crétacé.



Multiple phases of fracturation in Quercy (southwest France) limestones. Dating the stress record in an intraplate setting.

Stephen Brown^{*1,2}, Cécile Allanic¹, Benjamin Brigaud², Simon Andrieu¹,
Xavier Mangenot³, Quentin Deloume-Carpentras², Eric Lasseur¹

¹BRGM - France

²Université de Paris-Saclay, GEOPS, CNRS - France

³California Institute of Technology (CIT) – United States of America

This study questions the propagation of far field stress and the reactivation of inherited faults in the forelands during an orogeny. The NW-SE hercynian and the NE-SW variscan directions of structures in southcentral France forms the well-known “hercynian V” playing a major role in the subsequent sedimentation and tectonic deformation in the eastern Aquitaine Basin. The most important structures recognized in the area include the N20° Villefranche-Toulouse fault and the N150° West Quercynois Accident. Our study combines structural fieldwork with petrography and geochemical analyses of syn-kinematic calcites to better spatially and temporally characterize the linkages between intraplate deformations, the nature of associated syn-kinematic fluids and major events occurring at the plate boundaries.

Fieldwork observations and structural analyses reveal three principal directions: E-W reverse faults, NW-SE dextral and NE-SW sinistral strike-slip faults. Paleostress inversions show that they are kinematically coherent, all with a nearly N-S horizontal σ_1 . Moreover, evidence of E-W normal faulting exists, characterized by a N-S extension.

In order to conduct a petrographic and geochemical study, 30 oriented thin sections have been realized from calcite cement samples collected from faults and fractures. Observations of thin-sections with alizarin–potassium ferricyanide and by cathodoluminescence microscopy allows for documentation of the cement stages. The two different stress states (extension and compression) consist of specific cement type: calcite extensive (CAL-E) and calcite compressive (CAL-C). These two fracture fillings are characterized by two distinct geochemical signatures (-6.65 ‰ and -6.02 ‰ in d_{18O} and -3.80 ‰ and -0.24 ‰ in d_{13C}). In situ U-Pb age of syn-kinematic calcite suggest two distinct periods of tectonic activity during the (1) Campanian/Maastrichtian and the (2) Lutetian/Bartonian. Clumped isotope data suggests a crystallization temperature of about 45°C and d_{18O} of paleo fluid around 0‰.

Using this combined approach, we revisit the tectonic calendar revealing tectonic events not always clearly expressed in the field. We show that stress fields propagate throughout intraplate settings in the form of pulses of strong tectonic activity from the Pyrenean Orogeny.

Keywords: Quercy, Aquitaine Basin, syn-kinematic, calcite, U-Pb dating, d_{13C} , d_{18O} , δa_{47}



Evolution of the Manabí fore arc basin in Ecuador: from the accretion of oceanic allochthonous terranes to the uplift of the Andes and Coastal Cordilleras

María José Hernández ^{*1,2,3}, François Michaud ^{2,4}, Jean-Yves Collot ², Elia d'Acremont ³,
Jean-Noël Proust ⁵

¹ Departamento de Geología – Escuela Politécnica Nacional - Ecuador

² Géoazur – Observatoire de la Côte d'Azur, IRD, CNRS - France

³ Institut des Sciences de la Terre Paris (ISTeP) – UMR 7193, INSU-CNRS, Sorbonne Université - France

⁴ Faculté des Sciences et Ingénierie – Sorbonne Université - France

⁵ Géosciences Rennes – CNRS, Université de Rennes 1 - France

Along the Ecuadorian convergent margin, the onshore Manabí sedimentary forearc basin is bounded to the east by the foothills of the Andes, while to the north and west, it is limited by the Canandé and Jama fault systems. The fault systems limit basement blocks resulting from the fragmentation of an oceanic plateau topped by island arcs, which were accreted against the continental margin during the Late Cretaceous to Eocene times. From the interpretation of 2D seismic reflection profiles we identify the syn- and post-accretionary tectonic phases recorded in the Manabí basin area. We recognize 9 seismic units (S1 to S9) above the acoustic basement (Ub) separated by 9 unconformities (U1 to U9), which were dated by the correlation with the Ricaurte-1 well and regional stratigraphy.

Seismic units S1-S2 (Late Cretaceous to Eocene) onlap irregular basement topography interpreted as inheritance of eroded island arcs prior to accretion. S1 is deformed by low-angle NE-dipping thrust faults, which were sealed by regional unconformity U1. This unconformity is tentatively dated ~75 Ma and correlated with an early stage of collision. Then, E-dipping reverse faults were developed in the foothills of the Andes and are associated to an erosional and sedimentary hiatus (U2, Early-Middle Eocene), marking the last stage of accretion. The development of the modern forearc basin is marked by S3 deposition (Oligocene), which extends beyond the current edges of the basin. Then the overlying S4 depocenter (Early Miocene) migrated eastward as a result of the higher subsidence and depositional rates associated to the orogenic building effects of the Andean reliefs. An extensional stage is evidenced by a fan shape of S5 (17.8 -15.9 Ma) against the Jama fault. After U5 (top dated 15.9 Ma) and up to U8 (~5 Ma), a sedimentary platform was built by NW sedimentary progradation, thus marking a remarkable change in the mode of basin filling. The Coastal Cordillera uplifts during a Pliocene compressional stage (post S8) marked by an antiform development along the Jama fault system, and the uplift of the footwall block of the Canandé fault. Synchronously, Santo Domingo fan developed at the foot of the Andes causing the eastward down flexing of flat erosional surface U9. This stage coincides with the arrival in subduction of the Carnegie ridge.

Mots-Clés : Subduction, Ecuador, Manabí forearc basin



Mise en évidence d'un couplage entre tectonique regionale, tectonique salifère et climat contrôlant la sédimentation à l'Oligocène dans la région de Digne (Alpes du Sud-Ouest, France)

Alexandre Hamon^{1,2*}, Damien Huyghe¹, Caroline Mehl¹, Alexandre Pichat², Sidonie Révillon³ and Jean-Paul Callot²

¹ PSL Research University/ MINES ParisTech, Centre de Géosciences, 77305 Fontainebleau Cedex, France

² E2S-UPPA, Total, CNRS, Univ. Pau & Pays Adour, Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs-IPRA, UMR5150, 64013, Pau, France

³ UMR6538 Laboratoire Domaines Océaniques – IUEM, SEDISOR, Plouzané, France

L'impact relatif de la tectonique et du climat sur la sédimentation des bassins d'avant-pays reste une question majeure pour comprendre l'histoire des orogènes. Néanmoins, peu se sont intéressées aux stades orogéniques précoces, notamment dans les Alpes du SW. L' héritage structural y est important et les évaporites triasiques ont joué un rôle majeur sur la sédimentation mésozoïque en favorisant une tectonique salifère. Récemment, la réactivation de ces structures salifères au Paléogène a été suggérée. Les sédiments Oligocène de la région de St-Geniez, dans le Dignois, sont une cible idéale pour étudier les rétroactions entre ces différents forçages, de par leur proximité avec des affleurements d'évaporites triasiques, de leur position en bordure de l'avant-pays alpin et enfin, de leur mise en place pendant une grande rupture climatique globale.

Une approche multi-outils combinant, géologie de terrain, pour caractériser l'évolution de la déformation et des paléo-environnements de la série de St-Geniez, et analyses en laboratoire a été employée. L'analyse chemostratigraphique ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$) a permis de placer la limite Eocène-Oligocène à la base de la série, sous les dépôts conglomératiques. La mesure du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ montre que les gypses de la série sont issus du lessivage d'évaporites triasiques, qui affleuraient donc à l'Oligocène. La concentration élevée de Sr (jusqu'à 4000 ppm), mesurée par fluorescence X, sur l'ensemble de la coupe atteste d'une influence salifère se manifestant après le dépôt des conglomérats de base. Enfin, la détermination des contraintes oligocènes a permis d'identifier une compression N-S continue dans la zone.

Grâce à ces résultats, nous proposons que le diapir de Sorine, situé 3 km au SW de St-Geniez, a été réactivé au Rupélien et que le refroidissement de la limite Eocène-Oligocène a facilité l'affleurement des évaporites en érodant la carapace du diapir. La collision alpine a induit une compression N-S provoquant, avant le Chattien, la formation de l'écaille d'Authon. Au Chattien, le climat semi-aride a permis le lessivage des évaporites triasiques de l'écaille d'Authon et leur réprécipitation dans le bassin.

Mots-clés : Tectonique salifère ; climat ; diapirs ; limite Eocène-Oligocène ; Alpes



Structural style of the Languedoc Pyrenean thrust belt in relation with inherited structures and the rifting of the Gulf of Lion margin, SE France.

Romain Hemelsdaël^{*1} Michel Séranne¹, Eglantine Husson², Grégory Ballas¹

¹ Géosciences Montpellier - France

² BRGM Orléans - France

In Languedoc, the Pyrenean thrust belt remains poorly understood, as it is partly buried by the Gulf of Lion. The Pyrenean structures interact with inherited NE-trending faults forming a complex 3D array of basement faults and thin-skinned tectonics. We show evidences of basement high inherited from the Tethysian rifting and differential subsidence of the Jurassic series. The pre-Pyrenean structuration also includes the Early to Mid-Cretaceous extensional faults related to the Durancian uplift event. While the NE-trending Cevennes and Nîmes faults were reactivated as left-lateral ramp during the Pyrenean phase, the NS compression was also accommodated by E-W oriented thrusts. Pyrenean structures were later cut by the NE-trending extensional structures related to the rifting of the Gulf of Lion.

Onshore and offshore domains are correlated based on interpretations of existing and reprocessed 2D reflection seismic lines, and newly acquired onshore reflection seismic lines. The series of balanced regional cross sections provides a reappraisal of the Pyrenean structures in Languedoc, with special focus on the Montpellier-Thau area. We provide new geometrical constraints of the Montpellier Thrust at depth and original description of the thrust belt in the coastal area, including thrusts that are specifically localised above the inherited basement highs. Cross section restorations reveal a total shortening of 22 km across the Languedoc region although this estimate does not take into account the left-lateral motion accommodated by the major strike slip faults.

The Palaeozoic basement highs (Sète-Gardiole) separate different Tethysian blocks, and we propose that they correspond to restraining bends, which accommodated thrusting across the northern Pyrenean chain. During the Pyrenean orogeny, the Languedoc area formed a NE-trending left-lateral shear zone, encased between the Cevennes and Nîmes major faults. Such kinematics transferred NS shortening from the eastern Pyrenees to the Provence chain. Furthermore, distribution of the Mid-Cretaceous bauxites and Lower Cretaceous (Neocomian) series suggest similar kinematics. During the Mid-Cretaceous time, the Languedoc region formed an uplifted NE-trending transfer zone between the N-S extension in the Pyrenean rift and N-S extension in southern Provence.

Keywords : Pyrenean compression, Languedoc region, Gulf of Lion, Thau-Sète area, inherited tethysian fault, Durancian uplift phase, inherited basement high, fault reactivation.



Tectono-stratigraphic evolution of the Permo-Carboniferous Lorraine-Saar basin constrained by 3D geological modeling (France, Germany)

Romain Hemelsdaël* ¹, Laurent Beccaletto², Olivier Averbuch³, Alain Izart¹,
Raymond Michels¹, Imad Laouici¹*

¹ GéoRessources - Université de Lorraine-CNRS - France.

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

³ Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - Université des Sciences et Technologies de Lille-CNRS - France

The Permo-Carboniferous Lorraine-Saar Basin (LSB) was formed during the late Variscan orogeny as part of the Saxo-Thuringian retrowedge. The Permo-Carboniferous series in Lorraine buried below the Paris Basin corresponds to the southwestern continuation of the exposed Saar-Nahe Basin in Germany. In Lorraine, this basin consists of thick continental series (up to 8 km) deposited from Late Mississippian to Early Permian, over about 70 Myr. Despite the investigations dedicated to coal and petroleum explorations over the last century, there is no coherent regional stratigraphy and tectonic history between both Lorraine and Saar regions. In Saar this basin is considered as an inverted half-graben with a strike-slip component, whereas the Lorraine part displays a stronger compressive imprint, with a fold and thrust belt developing during the Pennsylvanian (i.e. Asturian) and Early Permian (i.e. Saalian phase). Moreover, 2D seismic lines in the Lorraine show evidences of inverted thrusts, allowing the accumulation of the Stephanian (Late Pennsylvanian) series in some half graben structures. These tectonic phases are characterised by rapid subsidence, migration of depocentres (towards the NE along the Metz-South Hunsrück fault system), significant erosion and changing sediment sources. To date there is no 3D representation and coherency between the buried structures and established stratigraphy. In the frame of the DEEPSURF project, existing structural cross-sections, interpretation of newly reprocessed 2D seismic lines, borehole data and geophysical logs are used to build a GOCAD 3D model of the Permo-Carboniferous series and controlling faults. The resulting 3D geometry of the series will enable to analyse spatial variations of subsidence and uplift across the intramountain, thereby providing new constraints on the slab dynamics along the bounding Rheno-Hercynian suture zone.

Mots-Clés : Late Variscan orogeny, Saar-Nahe Basin, Permo-Carboniferous, intramountain basin, tectonic inversion, Rhenohercynian subduction.



Distribution des faciès réservoirs en bordure de structures salifères

Amir Kalifi¹⁻²; Charlotte Ribes¹; Jean-Claude Ringenbach¹; Jean-Paul Callot²;

Jean-Loup Rubino¹; Josep Anton Munoz³;

1 TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Fégér (CSTJF) – TOTAL – France

2 Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs (LFC-R), Université de Pau et des Pays de l'Adour (E2S- UPPA), avenue de l'Université, Pau, France

3 Institut de Recerca Geomodels – Departament de Geodinàmica i Geofísica, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona (UB)

Les dépôts sédimentaires en bordure des structures salifères présentent de forts potentiels réservoirs (i.e. mini-basins du Golfe du Mexique). Dans ce contexte de bord de structures salifère, la succession sédimentaire est caractérisée par un empilement vertical de « **séquences halocinétiques** » que l'on appelle « **séquences halocinétiques composites** » (i.e. CHS). Ces séquences halocinétiques sont caractérisées par des dépôts s'amincissant et se rebroussant aux abords du diapir, séparées par des discordances angulaires. Ces géométries sont contrôlées par le rapport entre le flux vertical diapirique et le taux de sédimentation. Les séquences halocinétiques et les séquences halocinétiques composites ont été décrites à partir d'imagerie sismique et de données d'affleurements. Néanmoins, les études ne traitent pas de la description à haute résolution des variations de faciès et plus particulièrement, de la distribution des réservoirs dans les séquences halocinétiques. Par conséquent, plusieurs questions subsistent :

- Quelle est la distribution des faciès en bordure de structures salifères ?
- Existe-il un lien entre le type de séquence halocinétique et la distribution des faciès ? En d'autres termes, est-il possible d'être prédictif sur la distribution des réservoirs en bordure de diapir ?
- Est-il possible de reporter ce modèle à partir de données de sismiques ?
- Le type de système sédimentaire exerce-t-il une influence et si oui, laquelle ?
- Quelle est l'influence du contexte géologique ? (i.e. contexte compressif vs extensif)

Ce travail de post-doc propose d'apporter des éléments de réponses à partir d'analogues de terrain de classe mondiale : l'Oligo-Miocène du bassin de Sivas (Turquie) et le Crétacé inférieur du bassin sud-pyrénéen (Espagne). Ces deux analogues permettent d'inclure une large palette de séquences halocinétiques, d'environnements de dépôts (continentaux à marins, dépôts clastiques et/ou carbonatés), le tout, dans 2 types de bassins sédimentaires (i.e. en contexte de bassin d'avant-pays pour le bassin de Sivas ; en contexte extensif pour le Crétacé inférieur du bassin sud-pyrénéen). Il s'agira donc de proposer une cartographie détaillée avec des descriptions sédimentologiques détaillées dans l'objectif final de proposer un modèle prédictif de la distribution spatiale des faciès et des environnements de dépôts en bordure des diapirs salifères.



DistributionTOTAL - All rights reserved



Evolution syn-orogénique du système source to sink d'un retroforeland. Le bassin d'Aquitaine au Paléocène -Eocène.

Eric Lasseur^{*1}, Justine Briais ¹, Marine Prieur ¹, Alexandre Ortiz ^{*2,3}, Mustafa Al Reda⁴, Jocelyn Barbarand⁴, François Guillocheau ⁵, Nicolas Loget⁶, Sebastien Castelltort⁷, Charlotte Fillon²,

¹ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

² TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Fégér (CSTJF) – TOTAL – France

³ Université de Pau et des Pays de l'Adour – France

⁴ Université Paris Saclay

⁵ Univ. Rennes – France

⁶ Université Paris Sorbonne

⁷ Université de Genève – Suisse

La réinterprétation des données de sub-surface dans le bassin d'Aquitaine et les travaux menés sur les Corbières où affleurent le piémont pyrénéen permettent de reconstituer la déformation de ce retroforeland et l'évolution du système *source to sink* au cours de la période syn-orogénique, Eocène.

Après une phase de quiescence paléocène, l'activité tectonique est marquée dans le bassin par (1) une reprise de subsidence à la fin du Thanétien, (2) la mise en place d'un bassin flexural (Yprésien- Lutétien), contemporain de l'augmentation de la taille de la chaîne, et (3) la segmentation de ce bassin par la réactivation d'accidents hérités à partir du Bartonien, qui correspond à la collision *sensu stricto*. A ces trois phases, correspondent des systèmes *source to sink* différents, et permettent de préciser la compréhension des stades classiques (underfilled, filled, overfilled).

- 1- Le Paléocène (quiescence) enregistre une sédimentation carbonatée qui évolue depuis des systèmes récifaux vers des systèmes de rampes carbonatées. Durant le Thanétien supérieur (début de la période syn-orogénique), se mettent en place des systèmes turbiditiques mixte terrigène-carbonaté, alimentés par le Massif Central et vraisemblablement par les premiers reliefs pyrénéens orientaux.
- 2- L'Yprésien (orogénèse précoce) correspond à la croissance progressive des reliefs pyrénéens, et une augmentation des apports pyrénéens. Un remplissage rapide du *retroforeland* par des dépôts deltaïques a lieu. Les influences respectives des événements climatiques du début de l'Yprésien et de la déformation de l'avant-pays sur les volumes érodés et les architectures sédimentaires seront discutées. Le comblement progressif du bassin génère une large zone de transfert à partir du Lutétien.
- 3- Le Bartonien (collision) correspond à une exhumation importante de la chaîne. Dans le bassin d'Aquitaine, l'inversion des structures héritées génère la mise en place de multiples dépôt-centres plus ou moins déconnectés. Il en résulte une modification majeure du système *source to sink*, dans lequel l'augmentation des apports sédimentaires se traduit par un très faible export vers le bassin profond et une aggradation importante des piémonts.

Ces travaux de recherche ont été financés et réalisés dans le cadre des programmes Gaia (TEREGA, AEAG-BRGM), et Source to sink (TOTAL-BRGM)

Mots-Clés : Pyrénées, Bassin d'Aquitaine, avant pays, retroforeland, Eocène, source to sink



New geo-thermochronometric constraints on the evolution of the Pyrenean-Provençal orogen

Julien Léger ^{*1}, Raphaël Pik ¹, Mary Ford ¹, Sébastien Ternois ², Bouchaïb Tibari ¹,
Julien Mercadier ³, Chantal Peiffert ³, Gianluca Frasca ⁴

¹ CRPG, UMR 7358 - CNRS et Université de Lorraine, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France

² Géosciences Paris Sud (GEOPS), Campus Universitaire d'Orsay, 91405 Orsay Cedex, France

³ GeoRessources, UMR 7359 - CNRS et Université de Lorraine, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France

⁴ CNR Istituto di Geoscienze e Georisorse, 56127 Pisa, Province of Pisa, Italie

The detrital content of a foreland basin can be seen as a material archive of the adjacent orogen. By compiling the thermochronological ages of this detrital content, one can theoretically estimate the long-term histories of cooling and exhumation of the mountain range.

In practice however, a lot of complications related to exhumation (variation in space and time), erosion (multiple sources of sediment), and deposition patterns (sediment recycling) will likely modulate significantly the thermochronological signal recorded by the foreland. In this work, we tried (1) to understand the circumstances in which the foreland basin's detrital thermochronological signal can be regarded as a trustful tool to estimate the cooling and exhumation histories of the orogen ; (2) to increase the quantity of information classically obtained from conventional thermochronological methods.

The first part of this work was to use forward numerical modelling to simulate bedrock and detrital cooling-ages in a geographic domain undergoing orogenic processes. The numerical model is based on Pecube code (Fortran solver for three-dimensional heat transport equation, Braun 2003) and Cascade code (Fortran routine to model landscape evolution, Braun and Sambridge, 1997).

The second part of our work was to conduct a geo-thermochronological study of the synorogenic deposits of the Pyreneo-Provençal foreland. We focused our study on two key areas : the Corbières region (East of the Aude Valley, North of the Mouthoumet Massif) in the Pyrenean domain ; the Eastern Provence (East of the Aix Fault, corresponding mainly to the Arc syncline). Samples include syn-orogenic deposits with deposition ages ranging from Late Cretaceous to Eocene. Zircons were chosen as the only thermochronometer, as we expected partial or total thermal resetting with lower temperature thermochronometers such as apatite. Detrital zircons were double dated using single-grain in-situ U/Pb & (U+Th+Sm)/He geo-thermochronometry based on laser ablation. This approach allows robust estimation of the detrital cooling-ages spectrum of a sample, and offers more information concerning the thermal history of dated minerals, since the coupled U/Pb & (U+Th+Sm)/He ages can be employed for provenance analysis. These newly acquired ages are integrated in a unified orogenic scenario related to the evolution of the linking zone between Pyrenean and Provençal domains.

Mots-Clés : Pyrenees ; Provence ; thermochronology



Shale tectonic and alluvial fans deposits from the Jaca foreland basin: the case of the Orosia-Cancias system (Spain)

Lionel Menzer ^{*1}, Cédric Bonnel ¹, Francho Gracia, Charles Aubourg¹

¹ Laboratoires des Fluides Complexes et leur Réservoirs (LFCR) – Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA), CNRS UMR 5150, TOTAL – France

The Jaca basin (Spain) corresponds to the early south-western Pyrenean foreland depocenter fed by E-sourced deep marine turbidites then pro-delta shales during Eocene. It evolved as a piggy-back basin overfilled with continental N-sourced coarse sediments during its incorporation in the orogenic wedge from latest Eocene to Miocene times. The sedimentary response of this late-orogenic phase is characterized by the occurrence of several, km-scale large & thick alluvial fans confined by high amplitude but short wavelength, shale-cored anticlines.

New field observations and bed-to-bed mapping across the Orosia-Cancias alluvial fans associated with measurements of anisotropy of the magnetic susceptibility (AMS) within Eocene shales lead to : 1) reappraisal of the growth mechanism and kinematic of the shale- cored Yebra anticline and 2) the characterization of the subsidence history and the source-to- sink system of the associated alluvial fans.

The geometry of the Orosia-Cancias alluvial fans attests for their synchronous deposition with the growth of the tight Yebra anticline southward (Bartonian-Priabonian). The deformed magnetic fabric of shales in both limbs and within the welded hinge of the anticline is consistent with a shale withdrawal in response to a massive discharge of very coarse material within. It results a local modification of the sediment routing system and increasing subsidence allowing to the stack of conglomerates. The latest pulse of alluvial discharge in the Cancias fan eastward (Rupelian) is synchronous with the inhibition of the growth of the Yebra shale-wall.

This new tecto-sedimentary model for the evolution of the south-western Pyrenean alluvial deposits and associated shale-cored anticlines highlights the complex positive and negative interactions between. We especially shed light on the role of the early orogenic sedimentary inheritance preserved in the paleo-foredeep in the control of the subsequent deformation and sedimentary filling.

Mots-Clés : Foreland basin, shale tectonics, alluvial fans, tectonic-sedimentation interactions, South-Pyrenean Zone



Evolution du remplissage sédimentaire syn à post-orogénique des retro-bassin d'avant-pays : le cas du Bassin d'Aquitaine et du Golfe de Gascogne de 40 à 0 Ma

Alexandre Ortiz ^{*1,4}, François Guillocheau ², Eric Lasseur ³, Cécile Robin ²,
Justine Briaïs³, Charlotte Fillon ⁴

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour – France

² Univ. Rennes – France

³ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

⁴ TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Fégér (CSTJF) – TOTAL – France

Le bassin d'Aquitaine est marqué par un changement majeur au cours du Cénozoïque, il devient le retro bassin d'avant-pays du système pyrénéen. De nombreuses études se sont focalisées sur l'évolution du remplissage sédimentaire durant la phase paroxysmale de l'orogénèse pyrénéenne. Cependant peu d'études se sont intéressées au remplissage molassique durant la phase finie-orogénique à post-orogénique.

Afin de mieux contraindre le calendrier tectono-sédimentaire de la transition entre ces deux stades d'évolution, notre étude se base sur un nouveau modèle d'âge obtenu à partir de nouvelles données biostratigraphiques et raffiné grâce à l'orbitostratigraphie. Ce modèle d'âge met pour la première fois en corrélation les dépôts molassiques proximaux (Lannemezan) et leur équivalents marins (Golfe de Gascogne). Les nombreuses données disponibles (40 000 km de sismique réflexion, 1600 puits) ont été interprétées grâce aux méthodes de « stacking pattern » - et de stratigraphie sismique - « shoreline trajectory ». Lasynthèse de ces données est présentée sous forme de coupes et de cartes (isohypses, isopaques, paléogéographiques) qui renseignent précisément sur l'évolution de ces deux bassins. Les principaux résultats sont :

- (1) La période finie orogénique est marquée par la migration à la fois vers l'Ouest mais également vers le Nord des dépotcentres
- (2) La transition de syn- à post-orogénique se fait entre 27.1 Ma et 25.2 Ma, elle est matérialisée par la présence de trois discontinuités (érosion/by-pass) majeures recouvertes par une sédimentation tabulaire qui scellent les structures compressives
- (3) Le début de la période post-orogénique (entre 25.2 et 16.4 Ma) est remarquable par l'absence de sédiments préservés dans la partie proximale du bassin qui marque la mise en place du rebond isostatique
- (4) La suite de la période post-orogénique est marquée par un soulèvement majeur entre 16.4 Ma et 10.6 Ma du bassin d'Aquitaine sans doute contrôlé par la dynamique mantellique ouest européenne

Ce travail a été financé par le BRGM-TOTAL dans le cadre du projet Source-to-Sink.

Mots-Clés : Bassin d'Aquitaine, Golfe de Gascogne, Pyrénées, post-orogénique, stratigraphie sismique



Pliocene-Quaternary tectono-sedimentary evolution of the Guayaquil-Tumbes forearc basin (Ecuador-Peru)

Andréa Peuzin ¹, Nicolas Espurt ^{2*}, Marianne Saillard ¹, Cédric Bulois ¹,
François Michaud ^{1,3}

¹ Université Côte d'Azur, IRD, CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur, Géoazur, France.
² Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, Coll France, CEREGE, France

³ Sorbonne Université, Faculté des Sciences et Ingénierie, France

Forearc systems develop largely offshore above subduction zones between the trench and the volcanic arc. The associated forearc basins are generally parallel to the trench and involve vertical movements (subsidence vs. uplift), influencing the dynamics of the wedge. The object of the study is the Guayaquil-Tumbes forearc basin belonging to the Ecuadorian-Peruvian subduction zone. This forearc basin has peculiar characteristics, developing on the southernmost segment of a great active continental strike-slip fault, the Dolores-Guayaquil Fault, delimiting two crustal domains, the North Andean and Inca slivers. The divergent motions of the two slivers generate extension in the upper plate whose interaction with the strike-slip tectonics and subduction remains poorly constrained. Two major rivers, Chira and Tumbes, draining the Andean reliefs towards the Pacific, generate huge Pliocene-Quaternary silico-clastic sedimentary filling trapped in the basin, having an important impact on the growth of the wedge and fault activity. The objective of this study is to constrain the structural architecture of the basin by determining the nature, geometry and age of the major structures that controlled its Pliocene-Quaternary development. This study is carried out through the interpretation of offshore seismic profiles correlated with well data. The results show that the structure of the basin is dominated by gravitational instabilities (classical raft tectonic) detached northwestward and westward, and active through the Pliocene-Quaternary times. The syn-tectonic sediments and erosional surfaces indicate that these instabilities are progressively younger toward the south. We propose that this gravitational sliding has been sustained by high sedimentation rates and by the modern propagation of the Dolores-Guayaquil Fault at depth. This major fault is interpreted as an immature strike-slip system that progressively develops towards the trench.

Mots-Clés : Forearc, Gravitational sliding, syn-tectonic sedimentation, Ecuador, Peru



Closure of a hyperextended system in an orogenic lithospheric pop-up, Western Pyrenees: The role of mantle buttressing and rift structural inheritance

Nicolas Saspiturry¹, Cécile Allanic^{2*}, Philippe Razin¹, Benoit Issautier², Thierry Baudin²,
Eric Lasseur², Olivier Serrano², Sophie Leleu¹

¹ ENSEGID – Institut polytechnique de Bordeaux - France

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

The Early Cretaceous hyperextended Mauléon rift is localized in the north-western Pyrenean orogen. We infer the Tertiary evolution of the Mauléon basin through the restoration of a 153 km-long crustal-scale balanced cross-section of the Pyrenean belt, which documents at least

67 km (31%) of orogenic shortening in the Western Pyrenees. Initial shortening, accommodated through inversion of inherited crustal structures, led to formation of a pop-up structure, in which the opposite edges underwent similar shortening with different tectonic reactivation styles, localized versus distributed. Underthrusting of the Iberian margin accommodated further convergence, forming the Axial Zone antiformal stack of crustal nappes within a lithospheric pop-up. Thin-skinned and thick-skinned structures propagated outward from the heart of this pop-up, a block of strong mantle acting as a buttress inhibiting complete inversion of the Mauléon rift basin.

This work is part of the OROGEN project, cofunded by Total S.A., BRGM and Institut national de sciences de l'Univers (INSU).

Mots-Clés : Lithospheric pop-up, mantle buttress, Mauleon hyperextended basin inversion



Tectonic analysis of South Setifian domain and its neighbors area (Eastern Algeria)

El Hadj Youcef Brahim ^{*1}, Mohammed Chadi ², Abdelkader Khiari ³, Rami Djeflal⁴

¹ Department of Geology, Batna 2 University, Algeria

² Constantine 3 University, Nouvelle ville, Ali mandjli, Algeria

³ Department of Geology, Oum El Baouaghi University, Algeria

⁴ Constantine 1 University, Zouaghi sliman, Algeria

The present study focuses on area located at the southern fringe of external zones of eastern Algeria alpine belt, situated on the Aures meridian (Batna), in this area, fracturing is well developed, although, vegetal cover masks often structural and geological informations. This study aims to enhance the identification of major accidents and their associated geological structure in order to facilitate mapping by using Landsat satellite images and SRTM DEMs.

Structural analysis undertaken in this work have permitted to get new results specifying or modifying the results obtained by our predecessors, we can distinguish two types of folds : faulted-folds, in the northern part of the study area and propagation folds in the southern area, all anticlines associated to overlaps are verging south and we can not extend them to tangential tectogenesis.

The validation of these results was made on the basis of existing geological maps and photogeology and field knowledge.

KEYWORDS: Algeria, Landsat, satellite images, SRTM DEMs, structural analysis, folds.



Geodynamic evolution of the East Carpathian Foreland Basin since the Middle Miocene: Implications for sediment supply to the Black Sea and Dacian Basin

Arjan De Leeuw^{1,2*}, Stephen J. Vincent², Anton Matoshko³, Andrei Matoshko³,
MariusStoica⁴, and Igor Nicoara⁵

¹ Université Grenoble Alpes, ISTerre, France

² CASP, Cambridge, UK

³ Independent researchers, Kyiv, Ukraine

⁴ Faculty of Geology and Geophysics, University of Bucharest, Romania

⁵ Institute of Geology and Seismology of the Academy of Sciences of Moldova, Chişinău, Republic of Moldova

The Carpathian orogen is part of the Alpine-Himalayan collision zone and formed as the result of the collision of the Tisza-Dacia and ALCAPA mega-units with the European southern margin, following a protracted phase of subduction, slab roll-back and accretionary wedge formation. The foreland basin of the East Carpathians is 800 km long and stretches out across Poland, Ukraine, Moldova and Romania. We use the results of our intensive field research to unravel the sedimentary architecture of this basin and reveal how it responded to the final phases of foreland vergent thrusting, continental collision and subsequent slab detachment. We discuss the asymmetry in the basins evolution and eventual inversion and relate this to the diachronous evolution of the Carpathian orogen. We also address the impact of changing subsidence patterns and base-level changes on connectivity with the Central and Eastern Paratethys, important for faunal exchange and patterns of endemism.

We finally show that continental collision led to the establishment of a Late Miocene NW-SE prograding axial drainage system in the foreland supplying abundant sediment to the NW Black Sea, thus triggering large-scale shelf edge progradation.

Mots-Clés : Foreland Basin, Sedimentology, Geodynamics, Paratethys, Source-Sink, Field Geology



T1.7 Géodésie et Géophysique



Mesure de la déformation des Alpes par interférométrie radar : inventaire à grande échelle des mouvements gravitaires massifs et lents.

Pauline André^{*1}, Marie-Pierre Doin¹, Marguerite Mathey¹, Swann Zerathe¹,
Stéphane Baize²

¹ ISTerre, Université Grenoble Alpes, France

² IRSN/PSE-ENV/SCAN/BERSSIN, Fontenay-aux-roses, France

L'étude des déformations lentes, de l'ordre du millimètre par an, ont été rendus possibles récemment grâce aux avancées et aux améliorations de la technique de l'interférométrie radar multi-temporelle. Une première étude InSAR sur les Alpes occidentales réalisée par M. Mathey au cours de sa thèse et en utilisant la chaîne de traitement NSBAS, a permis d'établir une carte de vitesse de déplacements du sol selon la ligne de visée radar à partir des données Sentinel-1. Celle-ci a montré des taux de déplacements de plusieurs mm/an sur un nombre important de glissements lents et massifs, appelés DSGSD, Deep-Seated Gravitational Slope Deformation. Ces glissements de terrain restent assez méconnus, surtout en termes d'évolution temporelle récente. Dans cette étude, un inventaire de déformations gravitaires actives a été extrait à partir du champ de vitesse des Alpes occidentales. Cet inventaire est comparé aux observations géomorphologiques de DGDSD déjà publiées.

Les séries temporelles de quelques exemples ont été étudiées, notamment le glissement de Beauregard (Vallée d'Aoste) qui permet la comparaison avec de nombreuses données GPS. Nous présenterons les résultats du traitement d'une deuxième fauchée, complémentaire à la première, ce qui permet d'améliorer la qualité et la couverture de l'information de déformation extraite des cartes InSAR. Selon l'orientation des pentes vis à vis du radar, et le type de végétation, certains glissements peuvent être ou ne pas être détectés. Un inventaire grande échelle et systématique des glissements lents pourrait permettre d'identifier les zones actives, notamment en France où elles restent globalement méconnues.

Mots-Clés : InSAR, Alpes, mouvements gravitaires , DSGSD



Distribution du glissement asismique et partitionnement de la déformation le long de la zone de faille de Chaman (Afghanistan-Pakistan) par InSAR

Manon Dalaison ^{*1}, Romain Jolivet ^{1,2}, Elenora Van Rijsingen ¹, Sylvain Michel ¹

¹ Laboratoire de Géologie, Département de Géosciences, Ecole Normale Supérieure, CNRS UMR 8538, PSL Université – France

² Institut Universitaire de France – France

Sur près de 900 km de long, la zone de faille de Chaman (Afghanistan, Pakistan) accommode le déplacement entre les plaques Inde et Eurasie. Cette frontière de plaque se distribue sur plusieurs failles décrochantes majeures, dont les failles de Chaman, de Ghazaband et d'Ornach-Nal, sur une largeur de ~100 km. Bien que les modèles cinématiques globaux prédisent un mouvement décrochant total de 20 à 35 mm/an, très peu de grands séismes ont été enregistrés dans la zone et le glissement asismique décrit le long de la faille de Chaman a probablement une grande influence sur l'histoire sismique de la région. À l'aide de l'interférométrie par radar à synthèse d'ouverture (InSAR), nous étudions le partitionnement de la déformation entre les grandes failles décrochantes de la région ainsi que la distribution spatiale du glissement asismique le long de la faille de Chaman et sur les failles voisines. Nous établissons ainsi une cartographie fine de la distribution du glissement asismique en surface qui peut atteindre jusqu'à 4 mm/an le long de la faille de Chaman. Nous obtenons une description de premier ordre du glissement en profondeur et de sa répartition entre les failles par une exploration Bayésienne des modèles élastiques de déformation en profondeur. Nous identifions ainsi précisément la géométrie de la frontière de plaque et proposons une explication quant à l'activité sismique historique intrigante de cette région. Une faille majeure, précédemment ignorée et située dans la prolongation Nord de la faille de Ornach- Nal, accommode une partie significative du mouvement relatif entre l'Inde et l'Eurasie et permet d'expliquer l'occurrence de grands séismes dans la région.

Mots-Clés : InSAR, tectonique, faille décrochante, glissement asismique, partitionnement



ESHM20 source model versus strain rate map: comparison of moment rate estimates

Bénédicte Donniol^{(1)*}, Anne Socquet⁽²⁾, Céline Beauval⁽²⁾, Jesús Piña-Valdès⁽³⁾,
Laurentiu Danciu⁽⁴⁾, Shyam Nandan⁽⁴⁾

⁽¹⁾ISTerre, Grenoble Alpes University, Savoie Mont Blanc University, Axa Research Fund, France

⁽²⁾ISTerre, Grenoble Alpes University, Savoie Mont Blanc University, CNRS, IRD, IFSTTAR, France

⁽³⁾Universidad de Concepción, Chile

⁽⁴⁾Swiss Seismological Service, ETH Zürich, Zürich, Switzerland

Most national and international seismic regulations require quantifying seismic hazard based on probabilistic seismic hazard assessment (PSHA) methods. The probabilities of exceeding ground-motion levels at sites of interest over a future time window are determined by combining a source model and a ground-motion model. This research work aims at understanding how the measurement of strain rates by geodesy can provide constraints on the source model.

Earthquake catalogs, merging instrumental and historical data, are usually used to establish earthquake recurrence models. Although these catalogs extend over several centuries, the observation time windows are often short with respect to the recurrence times of moderate-to-large events and in some regions the recurrence models can be weakly constrained.

Strain rates maps were calculated for Europe using a combined velocity field (Piña Valdés et al. 2021). These strain rates are compared to the source model of the new European seismic hazard model (ESHM20, Danciu et al. 2021). More precisely, the moment rates estimated from the earthquake recurrence models are compared to the geodetically-derived moment rates. The first results show that a correlation exists between the seismically and geodetically derived moment rates, but the regression coefficient is not one. In areas characterized by high activity, such as Betics or Apennines for example, the moment rates derived by both methods are comparable. In areas of lower activity, such as at the interior of plates, the error associated with geodetic measurements is of the same order of magnitude as the measured strain, and the relation between catalog-based and strain-based moment is not straightforward. In this work we explore the different uncertainties in both data sets to understand better how both observables are related, and to assess under what conditions geodetic observations could be used in PSHA studies



Strain partitioning estimation in the eastern part of the tibetan plateau from block models constrained by GPS measurements and automated FLATSIM time series analysis of Sentinel-1 InSAR data

Laëtitia Lemrabet ^{*1}, Cécile Lasserre ¹, Marie-Pierre Doin ², Marianne Métois ¹, Anne Replumaz ², Philippe-Hervé Leloup ¹, Jianbao Sun ³, Marie-Luce Chevalier ⁴

¹ Université de Lyon, UCBL, ENSL, CNRS, LGL-TPE - France

² Université Grenoble-Alpes, CNRS, ISTerre - France

³ Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing - China

⁴ Key Laboratory of Continental Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing - China

The use of high spatial and temporal resolution data is a key condition for characterizing interseismic deformation along major faults and understanding their roles in accommodating the deformation. Here we present an analysis using 4 years of Sentinel-1 InSAR data to characterize interseismic deformation along the Xianshuihe (XSH) fault system and the Kunlun (KUN) fault in the eastern edge of the Tibetan plateau.

Thanks to the NSBAS automated processing chain (Doin et al., 2011, Grandin, 2015), implemented at the CNES high-performance computing center in Toulouse as part of the FLATSIM project (ForM@Ter LARge-scale multi-Temporal Sentinel-1 Interferometry processing chain in Muscat), we automatically perform high-resolution time series analysis of 2014-2019 Sentinel-1 InSAR data set, acquired along 1200 km-long ascending and descending orbits, over the study area. According to an elastic block model approach, InSAR time series are combined to the latest published GPS velocity field and inverted using the block modeling software TDEFNODE (McCaffrey., 2009) to model fault slip rates and coupling distribution along these two major strike-slip faults and identify asperities and potential creeping areas as well as analyze internal block deformation.

Our models suggest the existence of a fault connecting the XSH fault and the KUN fault and accommodating part of the deformation at a constant slip rate of 10 mm/yr. It shows that the slip rate on the XSH fault system increases from west to east, from 5 mm/yr to 14 mm/yr between latitudes 34.3°N and 29.3°N, while the slip rate on the Kunlun fault slightly decreases from west to east from 10 mm/yr to 9 mm/yr. The slip deficit rate observed along the XSH fault system shows strong lateral variations, that we analyze with respect to the seismic history of the fault, and suggests the presence of shallow creep on the eastern part of the fault. The slip deficit rate observed along the Kunlun fault appears more homogeneous. However, we observe a strong deformation gradient that we interpret as a post-seismic signal at the eastern tip of the rupture of the 2001 Kokoxili earthquake and we analyze its temporal evolution.

Mots-Clés : Seismic cycle, block models, Sentinel-1, time series analysis, InSAR, GPS, tibetan Plateau.



Reconstructing 10 years of spatio-temporal aseismic slip history along the San Andreas Fault near Parkfield

Sylvain Michel^{*1}, Romain Jolivet^{1,2}, Olivier Lengliné³, Adriano Gualandi⁴, Stacy Larochelle⁴, Blandine Gardonio¹

¹ Laboratoire de Géologie, Ecole Normale Supérieure, PSL University, France

² Institut Universitaire de France

³ Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Université de Strasbourg, France

⁴ California Institute of Technology, Department of Geology and Planetary Sciences, USA

The Parkfield segment of the San Andreas Fault (SAF) sits at the transition between the locked Cholame segment to the South and the SAF creeping segment to the North. This segment hosts regular ~ 6 earthquakes followed by postseismic slip with the last one in 2004. Recent studies based on geodetic data have highlighted spatial and temporal variations of aseismic slip rate in addition to postseismic slip. We combine Global Navigation Satellite Systems (GNSS), creepmeter and seismicity data over the 2006-2018 period to detail a comprehensive picture of episodic acceleration and deceleration slip patterns. We produce a catalog of relocated seismicity and repeating earthquakes. We use a variational Bayesian Independent Component Analysis (vbICA) decomposition on GNSS data to separate geodetic deformation due to non-tectonic sources from signals of tectonic origin. We then reconstruct the temporal evolution of fault slip to detect 11 slip transients, revealing the temporal complexity of the slip activity that followed the 2004 ~ 6 earthquake. We invert for a 3D fault slip distribution of each transient. Among the 11 transients, 8 are dominantly aseismic while 2 are related to ~ 4.1 and ~ 4.8 earthquakes. These slow slip events surround 2 regions that remain locked during the postseismic period. The partial overlap between detected slow slip and coseismic slip of the 2004 ~ 6 earthquake potentially highlights fault segments able to host both seismic and aseismic slip.

Mots-Clés : Global Navigation Satellite Systems, Parkfield segment of the San Andreas Fault, Post-seismic deformation, slow slip events, variational bayesian independent component analysis, repeating earthquakes



Déformation actuelle dans le fossé du Rhin supérieur à partir de données GNSS

Frédéric Masson ^{*1}, Eric Henrion ¹, Cécile Doubre ¹, Mustapha Meghraoui ¹

¹ École et Observatoire des Sciences de la Terre – Université de Strasbourg - France

Dans cette étude, nous présentons les derniers résultats obtenus par mesures géodésiques spatiales (GNSS) dans Le Fossé Rhénan Supérieur et les régions environnantes. Notre étude couvre une zone s'étendant du Jura au sud jusqu'au massif de l'Eifel au nord, et du plateau lorrain à l'ouest jusqu'au Wurtemberg à l'est de la Forêt Noire.

Cette vaste zone subit une micro-sismicité continue enregistrée par les réseaux de surveillance sismique et des séismes de magnitude modérée, notamment dans le sud de l'Alsace, les Vosges, la Forêt Noire et le Jura Souabe. À partir des mesures géodésiques, nous déterminons un champ de vitesses de surface qui permet de mettre en évidence l'occurrence et la localisation des gradients de vitesses et donc les déformations. Ces dernières peuvent potentiellement être reliées à la sismicité. Nous utilisons de longues séries GNSS mesurées de 2002 à 2018 avec le réseau dense GURN (GNSS Upper Rhine Graben Network).

Trois grands résultats peuvent être soulignés :

- 1 – Dans le sud, on observe un raccourcissement significatif entre le front alpin et le front du Jura, région qui justement présente une sismicité significative et notamment le plus grand séisme métropolitain historique, le séisme de Bâle de 1356 de magnitude Mw probablement supérieure à 6.5.
- 2 – Dans une très grande région allant de l'ouest des Vosges à l'est de la Forêt Noire, incluant une grande partie du Fossé Rhénan Supérieur et du Jura, il n'y a pas de variation significative des vitesses, tandis qu'il existe quelques séismes instrumentaux et historiques importants, comme ceux de Rambervillers de 2003 ou Remiremont de 1682.
- 3 – Autour de l'Eifel, on observe un mouvement de surrection probablement relié au volcanisme très récent (inférieur à 10 000 ans) de cette région.

La sismicité du fossé rhénan et des régions environnantes semble donc reliée aux déformations observées par géodésie au sud, vers les fronts des Alpes et du Jura, alors que ce n'est pas le cas au nord, dans les massifs des Vosges et de la Forêt Noire ou dans le Fossé Rhénan. Cela peut résulter d'une différence de processus, avec au sud un processus classique de type 'cycle sismique' tandis qu'au nord le processus reste à définir. Cela peut aussi résulter d'une déformation plus importante au sud, mesurable par la géodésie, alors qu'au nord, encore masquée dans les marges d'erreur.

Mots-Clés : Fossé Rhénan Supérieur, Champ de vitesse GNSS, Risques sismiques, Sismicité et Tectonique.



Transdimensional Estimation of Surface Strain Rates from GPS Measurements : Application to California.

Colin Pagani¹, Thomas Bodin^{*1}, Marianne Métois¹, Cécile Lasserre¹

¹ Laboratoire de Géologie de Lyon, Université de Lyon, Université Lyon 1, ENS de Lyon, CNRS, UMR5276 LGL-TPE

Investigating actively deforming areas often relies on strain rate calculations using geodetic data such as GPS velocities. Producing a continuous strain rate map from discrete data is an inverse problem traditionally tackled with standard interpolation schemes. However most algorithms rely on arbitrarily user-defined regression parameters that directly determine the smoothness of the recovered velocity field, and hence the amplitude of its spatial derivatives, resulting in biased estimates of the strain rates and their uncertainties. Here we propose a transdimensional Bayesian method to estimate surface strain rates from GPS measurements.

We parametrize the velocity field with a variable number of Delaunay triangles, and use a reverse jump Monte-Carlo Markov Chain algorithm to sample the probability distribution for the surface velocity and its derivatives. In that framework, the solution is the complete probability distribution function for each parameter given the observed data which can be represented using statistical measures and cross-sections. We also use the probability distribution to define uncertainty estimates on our models. We illustrate this Bayesian approach on synthetic test cases mimicking real geophysical settings and GPS data distributions where results are compared with those obtained with bicubic spline interpolation schemes. We show that our method is more resilient to noisy and variably densified data without requesting the manual tuning of a smoothing parameter, while also providing uncertainties associated with recovered velocities and strain rates.

Finally, using GPS velocities from the MIDAS dataset (Blewitt et al. 2016), we apply this method to the western US and estimate the probabilistic strain rates along the main fault systems, including the San Andreas system.

Mots-Clés : Strain rate, bayesian interpolation, GNSS, San Andreas



3D GNSS Velocity Field in Europe: Conciliating the observed seismicity with the tectonic and Isostatic deformation.

Jesús Piña-Valdès¹, Anne Socquet^{*1}, Céline Beauval¹, Pierre-Yves Bard¹, Marie-Pierre Doin¹, Nicola D'Agostino², Zhengkang Shen³

¹ Institute de Science de la Terre (ISTerre) – France

² Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) – Italy

³ Department of Earth, Planetary, and Space Sciences University of California, Los Angeles (UCLA) – USA

Probabilistic Seismic Hazard Assessment requires reliable earthquake recurrence models, usually based on time and spatial distribution of the past seismicity of catalogs. This usually generate models rather well constrained on seismically active regions, but on low to moderate seismicity regions establishing earthquake recurrence from past events is a major challenge. On those regions, geodetic measurements can provide useful information for deriving alternative recurrence models based on strain rate.

The impact of the crust deformation on the processes that control the seismic activity is still controversial. The seismic activity is usually thought to be associated to the active tectonic deformation as estimated from the horizontal displacements field. But in regions with low horizontal deformation, getting the horizontal strain rates is difficult since the displacements field can be dominated by the noise of the geodetic data. Additionally, non-tectonic processes such as the Glacial Isostatic Adjustment (GIA) can exist, and may impact the seismicity rate of those regions. Then seismicity rates derived from the horizontal velocity fields might not adjust the observed seismicity rates on such regions.

We present a method to build a combined GNSS velocity field dataset for Europe, that could be used to generate earthquake recurrence models. Using the velocity solutions of common stations, the different datasets are converted to a common reference frame. Then their uncertainties are homogenized. An automatic identification and outliers removal is applied, as well an adaptive smoothing scheme that depends on the station density, the noise and the local tectonic deformation rate. Using this method, 10 different GNSS velocity field solutions were combined, resulting in a velocity field with more than 3800 GNSS stations in Europe, from which a strain rate map is derived.

Assuming the Hooke law for the earth crust, we decompose the vertical velocity field into a component due to tectonic deformation and a component due to isostatic rebound. To better understand the effects of horizontal tectonic deformation versus the flexure generated by GIA on the seismicity, the spatial distribution of the seismicity is compared to the strain rate map and to the vertical velocity fields. Different scenarios for earthquake recurrence models are then proposed.

Mots-Clés : Strain Rate, Crustal Flexure, Seismic Hazard, Earthquake Recurrence models.



Rupture process of the November 2019 Durrës, Albania, earthquake

Cédric Twardzik^{*1}, Marianne Métois², Raphael Grandin³, Cécile Lasserre²,
LlambroDuni⁴, Edmond Dushi⁴, Rexhep Koçi⁴

¹ Institut Terre et Environnement de Strasbourg, France

² Laboratoire de Géologie de Lyon - Terre, Planètes et Environnement, France

³ Institut de Physique du Globe de Paris, France

⁴ Instituti i Gjeoshkencave, Energjise, Ujit dhe Mjedisit, Albania

On November 26, 2019, a magnitude 6.4 thrust earthquake struck in the northwestern part of Albania, near Durrës. With a death toll of 51 people, it was reported as the deadliest earthquake of 2019, because of local site effects in the sedimentary layers of the external Albanides and even if the rupture has not reached the surface.

One of the outstanding questions is to determine the causative fault plane of that earthquake since this could have a major impact for regional seismic hazard assessment. Indeed, one eastdipping plane coincides with the subduction interface which emerges offshore the coast of Albania, posing a potential tsunami threat if this plane is proven to be active, as suggested by the 1979 Montenegro earthquake (Mw 6.9). The other plane coincides with a shallower west dipping crustal backthrust running inland, thus close to major cities, in particular Tirana. So far, studies using geodetic data (mainly InSAR) have not been able to clearly identify a causative plane due to inherent ambiguity of surface deformation measurements.

In order to attempt answering this question, we investigate in detail the rupture process of this earthquake using a combination of InSAR data (ascending and descending Sentinel 1A tracks), GNSS data (both static and high rate), strong-motion and teleseismic data. Our results show that both planes lead to a similar slip distribution with one major slip patch close to the hypocenter with a peak-slip amplitude of ~1m. The compactness of the source makes it difficult to successfully distinguish the causative fault plane even with such a complete dataset. Precise relocation of aftershocks and possible postseismic relaxation motion could be the only discriminating observations to conclude with certainty on the rupture plane.

Mots-Clés : Albania, Earthquake Rupture, Seismic Hazards, Seismology, Geodesy

*Intervenant



T1.8 Pétrologie et chronologie métamorphique



Paléopendage de la subduction varisque au Carbonifère basal: contraintes pétrologiques

Michel Ballèvre^{1*}, Sarah Gommery¹, Pavel Pitra¹, Valérie Bosse², Jean-Louis Paquette²

¹ Géosciences Rennes - Université de Rennes 1 – Rennes – France

² Laboratoire Magmas et Volcans - Université Clermont-Auvergne – Clermont-Ferrand – France

Rares sont les unités tectoniques de haute pression préservant un gradient métamorphique de terrain. Il faut en effet (i) que la continuité physique de l'unité soit assurée, malgré les déformations syn- à post-nappes, (ii) que l'unité soit suffisamment grande pour que, malgré le faible gradient géothermique associé au métamorphisme de haute pression, un gradient de conditions P-T soit observé. Nous allons montrer que ces conditions sont réunies dans l'unité basale du Complexe de Champtoceaux (Massif armoricain).

Dans cette unité (dite du Cellier), les éclogites forment des lentilles métriques au sein de leptynites intensément déformées. Par leurs reliques texturales et leur composition chimique, il est possible de démontrer que la plupart des éclogites, de composition basaltique, dérivent de filons doléritiques. Ces métadolérites présentent des paragenèses à grenat-omphacite-quartz-rutile, avec des quantités mineures d'amphibole (barroisite, parfois glaucophane), zoisite et rarement disthène ou phengite. De rares éclogites (cinq échantillons sur 130) de composition andésitique à rhyolitique présentent des paragenèses à quartz-grenat-jadeite-disthène-rutile.

De nombreuses textures réactionnelles documentent tant la croissance du grenat que les premiers stades de la décompression (avec par exemple le remplacement de la jadeite par l'albite, ou la croissance de paragonite aux dépens des associations à omphacite (ou jadeite) - disthène. Enfin, la glaucophane se développe localement en surcroissance sur la barroisite.

Une étude systématique de la distribution des paragenèses, de la composition des minéraux (en particulier de la zonation du grenat), puis une modélisation de ces paragenèses permet de déterminer des conditions P-T du pic éclogitique, allant de 23-25 kbar – 600-650°C à 27-28 kbar – 700-730°C. Compte-tenu de la distribution géographique de ces paragenèses au sein de l'unité du Cellier, nous sommes en mesure de reconstituer un gradient métamorphique de terrain, en conditions éclogitiques, indiquant un paléopendage de la subduction varisque vers le Nord ou le Nord-Ouest.

Mots-Clés : éclogites, gradient métamorphique de terrain, conditions P-T, Champtoceaux

*Intervenant



Evolution pétrochimique et tectonique du complexe gneissique de l'île d'Yeu (Vendée, France)

Alex Bisch^{*1}, Antoine Triantafyllou¹, Gweltaz Mahéo¹, Véronique Gardien¹,
Christophe Monnier², Hervé Diot³, Julien Berger⁴, Bernard Charlier⁵

¹ Laboratoire de Géologie de Lyon – Terre, Planètes, Environnement (LGL-TPE) – CNRS : UMR5276, Université Claude Bernard Lyon I - France

² Laboratoire de Planétologie et de Géodynamique (LPG) – CNRS : UMR6112, Université de Nantes – France

³ Laboratoire de Planétologie et de Géodynamique (LPG) – CNRS : UMR6112, Université de la Rochelle – France

⁴ Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse (GET) – CNRS : UMR5563, Université Paul Sabatier Toulouse III - France

⁵ Laboratoire de Pétrologie, Géochimie et Pétrophysique, Université de Liège – Belgique

Nous présentons une étude structurale, pétrologique et géochimique du complexe gneissique de l'île d'Yeu (Vendée, France). Cette unité est rattachée à l'unité intermédiaire du Domaine Sud-Armoricain, ayant subi l'évolution tectono-métamorphique hercynienne. Le complexe étudié est composé d'unités orthogneissiques, intercalées d'une unité paradérivée ; l'ensemble de la pile tectonique étant recoupée de filons mafiques amphibolitisés.

Des interactions fluide-roche précoces exceptionnellement préservées sont caractérisées à l'aide d'une étude microthermométrique sur inclusions fluides et la méthode des droites isocones. Ces interactions affectent les différents protolithes, amenant à la formation de niveaux lithologiques sur-micacés.

Les résultats thermodynamiques (Perple_X), montrent que l'ensemble des unités étudiées ont subi un métamorphisme barrovien avec des pics à 550-730°C et 6-8 kbars. Au cours de cette évolution, la déformation ductile semble localisée dans les zones métasomatiques et paradérivées sur-micacées. Des conditions de fusion partielle hydratée sont mises en évidence dans le bas de la pile crustale, associées au passage de l'isograde de la sillimanite puis à la disparition de la muscovite. Une rotation des contraintes au pic de température est déduite des lithologies sur-micacées, suivie par la mise en place d'une zone de cisaillement sénestre à composante normale N110 au sud de l'île : la Shear-Zone du Sud del'île d'Yeu (SYSZ).

Le chemin rétrograde est postérieurement marqué autour de la SYSZ par un intense métasomatisme sodique associé à des fluides magmatiques réduits, s'oxydant à mesure de leur percolation. Il est également marqué par l'apparition dans les biotitites du cœur de la zone de cisaillement d'un assemblage à corindon-cordierite-sillimanite issu de la déstabilisation du staurotide. Cet événement se serait produit très localement à faible pression (3 kbars), associé à une augmentation de température d'environ 100°C (de 530 à 630°C).

Mots-Clés : Pétrologie, Modélisations thermodynamiques, Interactions fluides-roches, Tectonique, Orogenèse hercynienne



Contraintes sur la subduction continentale dans le massif de Dora-Maira : apports de la géochronologie U-Pb sur rutiles et sphènes

Guillaume Bonnet^{1,2,*}, Christian Chopin³, Bradley R. Hacker¹, Andrew Kylander-Clark¹, Michele Locatelli⁴

¹Department of Earth Science, University of California, Santa Barbara, Etats-Unis

²Institut des Sciences de la Terre de Paris, Sorbonne Université, Paris, France

³Laboratoire de Géologie de l'Ecole Normale Supérieure, Paris, France

⁴Dipartimento di Scienze della Terra, Ambiente e Vita, Università di Genova, Italie

Le massif de Dora-Maira (Alpes occidentales) fait partie des unités continentales subductées les plus étudiées au monde. Il est constitué d'une superposition de nappes d'épaisseurs infrakilométriques métamorphisées à haute-pression, du faciès schiste-bleu au faciès écolitique d'ultra-haute pression (UHP). Alors que l'unité UHP a été très étudiée, peu de données contraignent la chronologie de subduction et d'exhumation des autres unités.

Nous présentons ici des nouvelles observations pétrologiques et des données de géochronologie U-Pb sur rutile et sphène pour contraindre le pic et l'évolution rétrograde des différentes unités.

Nous comparons tout d'abord les dates U-Pb sur rutile des assemblages du pic UHP aux données de la littérature et les examinons en regard des températures de fermeture pour la diffusion du plomb. Les résultats confirment un pic métamorphique à 35 Ma et des taux de refroidissement rapides. Nous examinons ensuite les dates U-Pb sur rutile dans les autres unités plus froides, qui représentent donc des âges de cristallisation, entre 39 et 32 Ma.

La géochronologie U-Pb sur rutile et titanite permet également de contraindre l'âge de la rétro-morphose du massif de Dora-Maira à 32-31 Ma, rapidement après la subduction de l'unité basale, à la transition entre subduction et collision.



Elusive zircon record of water-fluxed orthogneiss melting in the Velay dome (Massif Central, France)

Simon Couzinié^{1,2*}, Pierre Bouilhol¹, Oscar Laurent^{3,4}, Jean-François Moyen²

¹ Université de Lorraine, CNRS, CRPG, F-54000 Nancy, France

² Université de Lyon, Université Jean Monnet, CNRS–IRD, Laboratoire Magmas & Volcans, F-42023 Saint-Etienne, France

³ ETH Zürich, Department Erdwissenschaften, Institute for Geochemistry and Petrology, Clausiusstrasse 25, CH-8092 Zürich, Switzerland

⁴ CNRS, Observatoire Midi-Pyrénées, Géosciences Environnement Toulouse, 14 avenue E. Belin, F-31400 Toulouse, France

Zircon U–Pb geochronology is routinely performed to decipher the timing and duration of melting events within the continental crust. A comprehensive understanding of the zircon behavior during anatexis is thus of critical importance to accurately assess the impact of crustal melting on orogenic processes. We investigated an anatectic system from the southern part of the Velay dome (Variscan French Massif Central) comprising late Carboniferous migmatites developed at the expense of peraluminous augen gneisses and associated with (leuco)granite bodies intrusive at higher structural levels. Our zircon U–Pb geochronological survey (494 analyzed grains) evidences a very limited record of the Variscan anatectic event. Indeed, oscillatory-zoned melt-precipitated zircon grains extracted from metatexites, leucosomes and (leuco)granites almost systematically yielded the late Neoproterozoic crystallization age of the orthogneiss protolith/source. Field and petrographic observations, whole-rock geochemical signatures, phase equilibrium and thermodynamically-constrained trace element modelling collectively indicate that partial melting of the orthogneisses took place at $T \sim 700^\circ\text{C}$ and was fluxed by ingress of external water, most likely originating from H_2O -rich dioritic or granitic magmas. The lack of new Variscan zircon growth observed in our dataset is intimately tied to the low melting temperature which is shown to restrict the amount of Zr being possibly dissolved in the melt phase (in terms of Zr melt solubility; Zr dissolution kinetics; and physical occlusion of zircon in restitic biotite). Peraluminous orthogneisses, yet highly fusible due to their “eutectic” subsolidus mineral assemblage, exhibit a very limited zircon record of low temperature water-fluxed melting meaning that zircon has little potential to provide reliable chronological constraints on water-fluxed melting episodes affecting such lithologies.

Mots-Clés : zircon geochronology, water-fluxed melting, anatexis, Variscan orogeny, Velay dome



Multidisciplinary characterization of fluid sources in ductile shear zones (Armorican Massif, Variscan belt, France)

Camille Dusséaux^{*1}, Aude Gébelin¹, Philippe Boulvais², Gilles Ruffet², Véronique Gardien³, Michel Dubois⁴, Marc Poujol², Nathan Cogné², Yannick Branquet^{2,5}, Catherine Mottram⁶, Fabrice Barou⁷, Andreas Mulch^{8,9}

¹SoGEES, University of Plymouth, PL84AA Plymouth, UK

²Géosciences Rennes, UMR CNRS 6118, Université Rennes 1, France

³LGLTPE, Université Lyon 1, France

⁴LGCgE, Université de Lille, France

⁵ISTO, Université d'Orléans, CNRS, BRGM, France

⁶SEGG, University of Portsmouth, UK

⁷Géosciences Montpellier, CNRS, Université de Montpellier, Université des Antilles, France

⁸Senckenberg Biodiversity and Climate Research Centre (SBiK-F), Frankfurt, Germany

⁹Institute of Geosciences, Goethe University Frankfurt, Germany

Ductile shear zones are sites of significant fluid circulation and hydrothermal alteration where metamorphic, magmatic and surface-derived fluids meet. Characterization of the meteoric source of crustal fluids can be used to better understand ore deposition and mineralization at the orogen scale or for stable isotope paleoaltimetry reconstructions. Microstructural, thermometry, geochronological and hydrogen (δD) and oxygen ($\delta^{18}O$) isotope data from syntectonic peraluminous granites from ductile shear zones in the Armorican Massif permit to determine the source of fluids present during deformation. Furthermore, they allow to study the spatial and temporal evolution of localized deformation and fluid-rock interaction across these Variscan fossil hydrothermal systems, including the timing and duration of fluid flow and water-mineral isotope exchange.

At the regional scale, a 41‰ difference in δD_{water} values amongst mylonitic leucogranite emplaced along strike-slip and detachment zones highlights a mixing relationship between metamorphic/magmatic fluids ($\delta D_{water} \sim -33\text{‰}$) and meteoric fluids with δD_{water} values as low as -74‰ . The mixing between surface-derived and deep fluids is further supported by fluid inclusions aligned along synkinematic structural planes in quartz grains from detachment footwalls. They contain very low to medium salinity water (0 to 7 wt% eq. NaCl) and have intermediate δD and $\delta^{18}O$ values.

We focus on the Quiberon detachment zone (QDZ) where synkinematic muscovite and tourmaline crystallized and equilibrated with deuterium-depleted surface-derived fluids during high-temperature deformation supported by titanium-in-muscovite thermometry and microstructures. $^{40}Ar/^{39}Ar$ data on muscovite and U(-Th)/Pb geochronology on zircon, monazite and apatite from syntectonic leucogranites, together with microstructural data, suggest that meteoric fluid-rock-deformation interactions started at ~ 320 Ma and played a major role in leaching uranium at ~ 305 Ma. U-Th/Pb data from migmatites located below the QDZ strengthen the idea that meteoric fluids infiltration, detachment activity, syntectonic leucogranite emplacement and migmatization were coeval and allowed the development of a sustained hydrothermal system.

Mots-Clés : Variscan; Armorican Massif; detachment; shear zone; fluid-rock interactions; meteoric fluids; hydrogen isotope; oxygen isotope; thermometry; $^{40}Ar/^{39}Ar$; U(-Th)/Pb; fluid inclusions



Caractérisation tectono-métamorphique de la zone de cisaillement ductile de Mugesse, Ubendian Belt (Malawi)

Josselin Gremmel ^{*1,2,3}, Pierre Trap ¹, Benjamin Le Bayon ², Ruth Mumba ⁴,
Thomas Fullgraf ², Philippe Lach ²

¹ Laboratoire Chrono-environnement, Université de Franche-Comté à Besançon - France

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

³ Laboratoire Géoazur, Université Côte d'Azur, OCA, CNRS, IRD, à Nice – France

⁴ Geological survey of Malawi, Zomba - Malawi

Les marges des cratons précambriens sont des systèmes géologiques à l'histoire souvent polyphasée en lien avec la succession de plusieurs cycles orogéniques qui rendent leur interprétation particulièrement difficile. C'est par exemple le cas de l'*Ubendian belt*, au Nord du Malawi. Il s'agit d'une ceinture Paléoprotérozoïque (~2100-1800 Ma) de 600 km de long sur 150 km de large bordant le craton de Tanzanie dont l'évolution précise reste encore mal comprise. Sa position stratégique à la jonction du craton Archéen de Tanzanie (au Nord), de l'*Irumide belt* (orogène *Kibaran* ~1400-1000 Ma) (au Sud), et de la *Mozambique belt* (orogène *Pan-African* 900-450 Ma) (à l'Est) suggère une évolution tectonique complexe avec une succession de réactivations.

L'étude de ces systèmes nécessite une approche multidisciplinaire permettant une compréhension globale de leur évolution géologique afin de discerner l'influence de chaque événement. Ici, une cartographie détaillée et l'analyse structurale sur le terrain ont été combinées à une étude pétrologique métamorphique et géochronologique en laboratoire. Nous présentons nos résultats pour l'étude de la zone de cisaillement ductile kilométrique de *Mugesse*, située au Nord du Malawi, qui est une des zones de cisaillement majeures qui composent l'*Ubendian Belt*. Une nouvelle carte géologique détaillée de la zone a été levée. Une analyse structurale complète des macros et microstructures met en évidence une cinématique senestre portée par une foliation verticale orientée NW-SE. Les trajectoires de foliation dessinent des structures typiques de cisaillement (C/S) en lien avec une répartition hétérogène de la déformation marquée par un gradient allant des proto-mylonites à des ultra-mylonites. L'analyse thermobarométrique à travers la construction de pseudo-sections apporte un pic de pression entre 13-15 kbar et 760-790°C dans le faciès amphibolite supérieur franchissant le solidus, et un trajet rétrograde en sens horaire au faciès schiste vert. Le lien entre le gradient de déformation des structures de cisaillements et le faciès métamorphique est clair, montrant l'exhumation progressive de la zone pendant le cisaillement. Cet événement est décrit comme une réactivation complète au Pan-Africain (~540 Ma) grâce aux datations U-Pb effectuées sur zircons et monazites in situ. Ces données géochronologiques ont également rapporté 2 âges plus anciens correspondant aux orogénèses précédentes de la région (*Ubendian*, *Irumide*).

Notre étude représente la première synthèse tectono-métamorphique complète d'une des zones de cisaillement majeures de l'*Ubendian belt*, et souligne la superposition de 3 événements orogéniques majeurs de l'histoire de cette région. C'est également un très bon exemple d'une structure de cisaillement typique marquée par une répartition hétérogène de la déformation pendant un trajet P-T rétrograde.

Mots-Clés : Tectonique, zone de cisaillement de Mugesse, Ubendian Belt, déformation ductile,



métamorphisme, géochronologie, Nord Malawi, Précambrien, Pan-Africain, mylonites



Experimental study of deformation effect on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating in muscovite

Alexane Legeay ^{*1}, Stéphane Scaillet ¹, Jacques Précigout ¹, Holger Stünitz ^{1,2}, and Florian Duval ¹

(1) Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO), UMR 7327, CNRS-BRGM, Université d'Orléans, France ;
(2) Department of Geology, University of Tromsø, Norway

The effect of temperature for argon retentivity is a well-known process, while the role of deformation for argon diffusion remains very elusive. To address this issue, we performed deformation experiments followed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating on white mica within a Hercynian granite (Carnac, France). A set of cores were deformed using a solid-medium, Griggs-type apparatus at a pressure of 1.2 GPa and a temperature of 650 °C. These conditions have been chosen so that muscovite can deform viscously in nominally open-system conditions for argon, but without any melting. Coaxial deformation has been applied for different amounts of shortening between 15% and 30%. Each experiment was backed by a control experiment performed in the same pressure-temperature-time conditions, but without deformation (hot pressing) to constrain the influence of temperature alone. While a first set of experiments was performed as-is (no water added), a second set of experiments has been performed in the same conditions, with 0.2 wt.% water added. *In-situ* UV laser ablation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating was then applied on muscovite. While $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages on the starting material are homogeneously close to 305.5 ± 0.4 Ma, the control experiments show a slight rejuvenation with a very homogeneous spatial distribution (295.2 ± 0.2 Ma for the hot pressing without water added). In contrast, deformed samples – with or without water added – display more scattered ages with pronounced rejuvenation and heterogeneous spatial distribution controlled by grain size and location of ablation spot (core-rim gradients). Local rejuvenation can amount to up of 45% ^{40}Ar loss. Such argon loss is spatially correlated with deformation features.

Key words: experimental deformation, muscovite, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, argon retention



Le magmatisme basique filonien de Damrane (faisceau de la Daoura, monts de l'Ougarta, Algérie): pétrologie, géochimie et contexte géodynamique.

Mekkaoui Abderrahmane^{*1}, Remaci-Benaouda Nacera², Ameri Sara³

¹ Faculté des sciences et technologie, département de génie civil - hydraulique, université de béchar, Algérie

² Laboratoire de géo-ressources et risques naturels, université d'oran, Algérie

³ Laboratoire enargarid, université tahri mohamed, béchar, bp 417, Algérie

Cette étude a pour objectif d'étudier les dolérites du massif de Damrane et parvenir à une discussion sur leur source pétrogénétique et de les placer dans un contexte géodynamique plus globale. Ce massif se rapporte au faisceau de la Daoura (monts de l'ougarta), il se trouve à une soixantaine de kilomètres au sud-ouest de l'oasis de Tabelbala.

Aux limites de ce massif, on distingue trois ensembles lithologiques distincts : **(a)** Complexe de base, de dit Groupe de "Sebkha el Melah", (Mekkaoui 2015), d'âge néoprotérozoïque. Il s'agit d'une puissante alternance de grauwakes et des pelites, à caractère flychoïde. **(b)** Ensemble volcano-plutonique constitue la quasi-totalité du massif volcanique (80%). Il est composé d'empilement de coulées basaltiques, andésitiques, de dômes rhyolitiques et des diorites sous forme de laccolite. **(c)** Des dykes et sills doléritiques. Ces derniers sont sécants sur l'ensemble de terrains précambriens et paléozoïque, et sellées par les dépôts tertiaires et quaternaires. Ils sont bidirectionnels, rarrangés en deux groupes : **(i) - Groupe 1**, de direction ougartienne (N 125° à 140°), sont mieux discernables dans le complexe de base néoprotérozoïque. Ces dolérites montrent une texture intergranulaire. La paragenèse minérale de ces dykes est dominée par un plagioclase de type andésine, un pyroxène essentiellement augitique et de l'ilménite. Ces dolérites sont de composition basique (SiO₂ compris entre 47.96 et 50.29%) avec des teneurs élevées en Fe₂O₃ (12.33-14.99%), TiO₂ (3.45-3.62%), P₂O₅ (0.86-1.06%), Y (32.5-59% ppm), Zr (262.1-287.1 ppm) et V (246.9-297.3 ppm) et des teneurs basses en Al₂O₃ (12.61-13.32%), CaO (5.52-6.77%), K₂O (0.19-0.87%) et modérées en Nb (11.4-15 ppm). Elles présentent des concentrations en K₂O anormalement élevées. Elles se caractérisent une affinité de **tholéiites continentales**, d'âge 102 Ma avec des teneurs élevées en TiO₂ et Fe₂O₃, P₂O₅, Y, Zr et basses en MgO (type HPT= high P₂O₅ - TiO₂tholeiites). Elles sont formées à partir de la cristallisation fractionnée et la contamination crustale significative d'un magma sursaturé en silice (anomalies négative en Nb, positive en Pb, le rapport La/Nb élevé, un rapport isotopique initial du Sr élevé (0.7084) et des εNd négatifs (-1.87 à -2.24). Un magma qui dériverait de la fusion partielle d'un manteau lithosphérique fertile dans le domaine de stabilité du spinelle : à partir d'une lherzolite à spinelle. **(ii) - Groupe 2**, ce sont des dykes doléritiques de **direction Ksiksou** (N35° à 60°), encaissés dans le complexe de base, dans les volcanites et dans la couverture cambro- ordovicienne, sellés par les formations néogènes. Ces dykes se caractérisent par une extension géographique régionale. Ces dolérites ont une texture intersertale à subophitique, où les minéraux primaires sont du plagioclase (bytownite à andésine), clinopyroxène (augite et pigeonite) et titanomagnétite. Ce groupe composé essentiellement de roches basiques (SiO₂ compris entre 50.54 et 51.22 %), se détache du groupe 1 avec des teneurs plus élevées en MgO (6.05-6.88 %), Ni (56.9-68.4 %), Cr (126.5-198.5) et plus faibles en Fe₂O₃ (11.04-11.75%), TiO₂ (1.07-1.33%), P₂O₅ (0.13-0.19%), Y (22.6-29.9% ppm), Zr (100.42-121.9 ppm), Nb (4.2-6.7

ppm) et V (241.5-263.5 ppm). Son affinité est "**tholéiites continentales**" avec des teneurs basses en TiO₂ et Fe₂O₃, P₂O₅, Y, Zr, Nb et plus importantes en MgO (type LPT = low P₂O₅ - TiO₂tholeiites). Elles se sont formées à partir de la cristallisation fractionnée (fractionnement du clinopyroxène et du plagioclase) et contamination crustale significative d'un magma saturé en silice (anomalies négative en Nb, positive en Pb, le rapport La/Nb élevé). Elles dérive d'une fusion partielle d'un manteau lithosphérique appauvri, probablement de type harzburgitique. Ces dolérites appartiennent à la CAMP.

ppm) et V (241.5-263.5 ppm). Son affinité est "**tholéiites continentales**" avec des teneurs basses en TiO₂ et Fe₂O₃, P₂O₅, Y, Zr, Nb et plus importantes en MgO (type LPT = low P₂O₅ - TiO₂tholeiites). Elles se sont formées à partir de la cristallisation fractionnée (fractionnement du clinopyroxène et du plagioclase) et contamination crustale significative d'un magma saturé en silice (anomalies négative en Nb, positive en Pb, le rapport La/Nb élevé). Elles dérive d'une fusion partielle d'un manteau lithosphérique appauvri, probablement de type harzburgitique. Ces dolérites appartiennent à la CAMP.

Mots-clés: Damrane, tholéiites continentales, contamination, CAM



Âges du magmatisme et métamorphisme du (méta)gabbro de l'ophiolite du Chenaillet. Datation U-Pb in situ sur lame mince en contexte textural des zircon, sphène, monazite et xénotime

Christian Nicollet ^{*1}, Jean-Louis Paquette ¹, Emilie Bruand ¹, Valérie Bosse¹,
Inès Pereira ¹

¹ Laboratoire Magmas et Volcans, Université Clermont Auvergne - France

L'ophiolite du Chenaillet au sud de Montgenèvre représente une portion conservée de l'océan alpin. Les gabbros forment des corps lenticulaires de 50 à 200m d'épaisseur et qqes centaines de mètres de large. Ils sont intrusifs dans les serpentinites et souvent surmontés par les laves en coussin. La lithologie des gabbros est variée. Dans qqes affleurements de troctolites, amphibole et chlorite remplacent l'olivine. Des filons de plagiogranites sont rares. Dans le gabbro s.s., clinopyroxène et plagioclase sont souvent séparés par de l'amphibole brune à verte +/- ilménite / sphène. La thermométrie sur ces assemblages à amphibole indique une évolution rétrograde des températures entre 950-900°C, 800-750°, 600-500°. Dans une zone de cisaillement un chapelet de grains de sphène +/-ilménite se localise dans une niveau amphibolitique dont la température est estimée à 600-550°C. Le minéral est associé à de rares cristaux de monazite et xénotime. Ces 3 minéraux ont des teneurs élevées en éléments en trace. Le sphène concentre jusqu'à 10% de REE, Y, Nb... et en particulier en U,Th et Pb, teneurs autorisant la datation in situ sur lame mince en contexte textural par LA-ICPMS. Nous avons réalisé dans le même échantillon la datation du zircon, indiquant l'âge du magmatisme et des monazite, xénotime et sphène datant l'évolution métamorphique. Dans un diagramme Tera Wasserburg, la majorité des zircons sont concordants et indiquent un âge de 161.0 +/- 0.8 Ma, similaire à celui d'un filon de plagiogranite (161.8 +/-1.7 Ma). Les 3 minéraux monazite, xénotime et sphène indiquent respectivement des âges de 161.3 +/-4 Ma, 161.5 +/-2.4 Ma et 158.4+/-2.3Ma. Ces âges identiques dans les erreurs analytiques témoignent que magmatisme et métamorphisme ne sont pas significativement différents. Une modélisation thermique prédit qu'un massif de 200m d'épaisseur se refroidit en qqes milliers d'années et confirme que le métamorphisme rétrograde dans ce massif enregistre le refroidissement du gabbro.

Mots-Clés : Chenaillet, métagabbro, datation LA-ICPMS, U-Pb.



Coronites complexes à corindon – högbomite - preiswerkite autour du spinelle dans les péridotites du Massif de Lanzo, Alpes Occidentales italiennes

Christian Nicollet ^{*1}, Morgan Rouleau ¹

¹ Laboratoire Magmas et Volcans, Université Clermont Auvergne - France

Dans les Alpes Occidentales, le massif de Lanzo est une portion de manteau sous continental exhumé lors de l'océanisation alpine, enfoui lors de la subduction de l'océan alpin et exhumé lors de la collision. Ce cycle complet de la lithosphère océanique est enregistré pétrologiquement par les différentes roches du massif : lherzolites, serpentinites, filons de gabbros. Le massif de Lanzo est composé de péridotites à spinelle / plagioclase entouré d'une enveloppe de serpentinites. Des plages de plagioclase plus ou moins préservées sont le résultat d'une imprégnation magmatique. Dans le cœur du massif, la péridotite est peu hydratée et le spinelle est entouré d'une couronne blanche millimétrique de plagioclase partiellement remplacé par un enchevêtrement de minéraux de HP : jadéite, zoïsite, grenat et paragonite.

En bordure du massif, proche de l'enveloppe de serpentinites, dans la péridotite hydratée, les olivines et partiellement les pyroxènes sont remplacés par de l'amphibole tandis que les plages de plagioclase sont rarement préservées au détriment d'un agrégat de chlorite + amphibole sodique en périphérie et de minéraux de HP au cœur. Une couronne brune s'intercale entre le spinelle et la couronne blanche de l'ancien plagioclase. Cette couronne brune millimétrique est constituée de cristaux automorphes de corindon et högbomite. La couleur brune est due à l'abondance de bourgeons de Cr spinelle. Notons la présence de quelques cristaux d'ilménite. Cette couronne de corindon est corrodée et remplacée par la preiswerkite. Au-delà de la couronne de corindon, la couronne blanche est constituée d'un ensemble imbriqué de chlorite et preiswerkite entouré de zoïsite ± jadéite. La högbomite et le corindon se forment par altération du spinelle durant l'hydratation précoce de la péridotite au début de l'océanisation. La preiswerkite serait contemporaine des minéraux de haute pression, formés au cours de la subduction/exhumation.

Mots-Clés : Massif de Lanzo, Alpes, péridotites, preiswerkite, högbomite, océanisation, subduction, collision



Métamorphisme barrovien anté-alpin dans le massif Dora-Maira: contraintes pétrologiques et géochronologiques

Francesco Nosenzo¹, Paola Manzotti¹, Michel Ballèvre^{2*}, Marc Poujol²

¹ Department of Geological Sciences – Stockholm University – Stockholm – Suède

² Géosciences Rennes - Université de Rennes 1 – Rennes – France

Si l'histoire alpine du massif Dora-Maira a fait l'objet de nombreuses études, son histoire anté-alpine reste encore largement inexplorée. Mettant à profit l'existence de domaines faiblement déformés durant l'orogénèse alpine, nous nous attacherons à décrire l'évolution pré-orogénique de ce socle paléozoïque, où figurent deux lithologies majeures.

La première lithologie est constituée par de rares orthogneiss à foliation pré-alpine conservée. De composition chimique peralumineuse ($A/CNK = 1.28$), l'orthogneiss préserve de son histoire magmatique (i) de rares enclaves microgrenues sombres, (ii) des porphyroclastes d'orthose, et (iii) des cristaux de zircon ayant fourni un âge U-Pb LA-ICP-MS de 442 ± 2 Ma. La foliation de l'orthogneiss, à plagioclase – biotite – grenat – muscovite, témoigne d'une déformation ductile pervasive dans les conditions du faciès des amphibolites.

La seconde lithologie, de loin prédominante, est constituée de micaschistes à grenat centimétrique et pseudomorphoses prismatiques allongées, à chloritoïde et mica, dérivant de porphyroblastes de staurotide. L'empreinte alpine, dans les échantillons étudiés, est négligeable (préservation de la muscovite, surcroissances de grenat étroites, voire absentes, absence de foliation alpine). Le grenat contient des inclusions (quartz, ilménite, staurotide pseudomorphosée en bordure des grains) et une zonation chimique avec diminution de la teneur en Sps du cœur vers la bordure. Cette zonation autorise une modélisation de la croissance du grenat anté-alpin, dont trois étapes sont reconstituées en modifiant la composition du volume d'équilibration dans la roche. Le grenat commence à croître vers 510-530°C, 4-6 kbar, et achève sa croissance dans le champ de stabilité de la staurotide vers 650- 660°C, 6-8 kbar, caractérisant ainsi un métamorphisme barrovien.

Un effort important a été effectué en vue de caractériser l'âge de ce métamorphisme barrovien. La distribution des inclusions d'apatite, de zircon, et de monazite dans le grenat, et la datation de la monazite et du zircon (U-Th-Pb, LA-ICP-MS) permet, en lien avec leur composition en éléments traces, de déterminer les étapes de l'évolution de ces roches au Carbonifère supérieur.

Ainsi se dessine, pour le socle anté-alpin du massif Dora-Maira, une base de données robuste permettant de discuter la position anté-alpine de ce socle, avec des implications sur les processus éventuels de ré-hydratation durant la subduction continentale alpine.

Mots-Clés : grenat, zircon, monazite, LA-ICP-MS, Dora-Maira, Alpes



The Eastern Tobífera Thrust: an important accommodation structure for the closure of the Rocas Verdes Basin, Patagonian Andes (52°-54° S)

Veleda Astarte Paiva Muller ^{*1}, Mauricio Calderón ², Julie Fosdick ³, Matias Ghiglione ⁴, Clare Warren ⁵, Hans-Joachim Massonne ⁶, Mark Fanning ⁷, Leonardo Cury ⁸, Pietro Sternai ¹, Cristobal Ramírez de Arellano ²

¹ Department of Earth and Environmental Sciences, University of Milano-Bicocca, Milan – Italy

² Engineering Faculty, Andrés Bello University, Santiago – Chile

³ Department of Geosciences, University of Connecticut, Storrs – USA

⁴ Institute of Andean Studies “Don Pablo Groeber”, University of Buenos Aires, Buenos Aires – Argentina

⁵ School of Environment, Earth & Ecosystem Sciences, The Open University, Milton Keynes – UK

⁶ Fakultät Chemie, Universität Stuttgart, Stuttgart – Germany

⁷ Research School of Earth Sciences, Australian National University, Canberra – Australia

⁸ LAMIR Institute, Federal University of Paraná, Curitiba – Brazil

The *Western Domain* of the Magallanes Fold-and-Thrust Belt (MFTB) in Chilean Patagonia between 52°-54°S is part of a key region connecting the N-S Patagonian sector and the E-W oriented Fuegian sector of the southernmost Andes. This basement hinterland domain of the MFTB comprises tectonic imbrications of pre-Jurassic basement, ophiolites, and volcano- sedimentary successions that originated in the Late Jurassic-Early Cretaceous Rocas Verdes Basin (RVB). From a field study we unraveled NNW-SSE oriented structures conforming their tectonic contacts, and recognized mylonitic zones at the hangingwall of the defined *Eastern Tobífera Thrust* being the structural connector between the thick and the thin- skinned sectors of the MFTB, and to the west of this. The shear zone is defined by (proto)mylonitic metatuffs and metapelites with a characteristic NE-verging S_1^* foliation. From major-element compositions of whole-rock and metamorphic minerals in these mylonites, pseudosections were constructed and pressure-temperature (P-T) conditions between 3.5-5.5 kbar and ca. 230°-390°C derived. These conditions are consistent with tectonic burial to intermediate crustal levels (~15-20 km depth) and with those of the mylonites from the *Canal de las Montañas Shear Zone* (51°-52°S). This shear zone constitutes a ~400 km long lithospheric structure that accommodated the underthrusting of RVB successions in a relatively cold accretionary wedge. Additionally, the metamorphic conditions of the rocks from the Patagonian sector of the MFTB were cooler than the P-T conditions recorded by rocks from the Fuegian sector of the RVB (south of the *Estrecho de Magallanes*), revealing different magnitudes of hinterland exhumation along the strike of the belt. Different geochronological data, including a new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ white mica age of ca. 70 Ma determined on mylonites of the study area, are consistent with a post-Maastrichtian upliftage of the hinterland of the MFTB in the Patagonian and Fuegian sectors.

Mots-Clés : Andes, Orogen, mylonite, shear zone, petrology, geochronology



Origine de la discordance dans des monazites de Ultra Hautes Températures du complexe Archéen de Napier (Antarctique)

Marion Turuani^{1*}, Anne-Magali Seydoux-Guillaume², Denis Fougerouse^{3,4}, David Saxey⁴, Antonin Laurent^{1,2}, Simon Harley⁵, Steve Reddy^{3,4}, Stéphanie Reynaud⁶, William Rickard⁴

¹ LMV, Université de Lyon, UJM-Saint Etienne, France

² LGL-TPE, Université de Lyon, UCBL, ENSL, France

³ School of Earth and Planetary Sciences, Curtin University, Western Australia

⁴ John de Laeter Centre, Curtin University, Western Australia

⁵ School of Geosciences, University of Edinburgh, UK

⁶ Laboratoire Hubert Curien, UJM-Saint Etienne, France

Le Complexe de Napier (Antarctique Est) est un segment de croûte archéenne ayant connu une histoire complexe, ponctuée d'un événement métamorphique de ultra-haute température (UHT) à 2,55–2,45Ga. Les roches provenant de cette région gardent la mémoire de cette paragenèse granulitique avec un assemblage à grenat, quartz, feldspath, sillimanite et biotite et cristallisent après le pic de métamorphisme. Elles contiennent de plus des cristaux de monazite qui présentent des âges isotopiques U–Th–Pb discordants s'étalant sur plusieurs centaines de millions d'années entre ~2,4Ga et ~1Ga. L'étalement des âges n'est pas lié à des zonations chimiques dans les grains. En revanche, il existe une nette corrélation entre la position texturale des cristaux de monazite et le degré de discordance. Les âges apparents $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ les plus anciens sont mesurés dans des monazites incluses dans les quartz et grenats, tandis que les âges apparents les plus jeunes sont mesurés dans les monazites de la matrice.

Les méthodes de datation *in-situ* classiques (LA–ICP–MS, SIMS, EMP) ne permettent pas de s'affranchir de cette perturbation isotopique aboutissant à des âges sans signification géologique. Cette perturbation s'explique à travers l'étude texturale (MEB, EMPA, MET) de ces monazites jusqu'à l'échelle nanométrique montrant une multitude de nano-inclusions riches en Pb de différentes natures minéralogiques. La datation $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ par Sonde Atomique Tomographique (SAT) a permis de s'affranchir de ces inclusions et de contraindre les processus et l'histoire géologique de ces roches. L'âge moyen $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ des monazites, exempt d'inclusions est à 1011 ± 33 Ma et correspond à un événement géologique connu en Antarctique, la formation du Rayner Complex, qui a marqué certaines régions du Napier à travers la formation de zones de cisaillement canalisant la circulation de fluides crustaux.

Mots-Clés : monazite, SAT, nanogéochronologie, UHT, Antarctique, discordance



Evolution pression-température de deux épisodes de haute-pression au Dévonien Supérieur dans le Massif Central Français.

Anissa Benmammar^{*1,2}, Julien Berger¹, Stéphanie Duchêne¹, Abderrahmane Bendaoud², Jean-Marc Baele³, Olivier Bruguier⁴

¹Géosciences Environnement Toulouse (GET), Université Paul Sabatier (UPS)-Toulouse III, CNES, CNRS : UMR5563, IRD : UMR239, Toulouse, France

² Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), LGGIP, Faculté des Sciences de la Terre et Aménagement du territoire, Alger, Algérie.

³ Université de Mons, département de géologie et géologie appliquée, Mons, Belgique

⁴Géosciences Montpellier, CNRS, Université de Montpellier, France

Le métamorphisme de haute-pression (HP) dans le Massif Central Français (MCF) se localise dans deux unités différentes : (i) l'Unité des Gneiss Supérieurs (UGS) formée par des paragneiss migmatitiques renfermant des élogites rétro-morphosées ; (ii) une unité intermédiaire (UI) dominée par des micaschistes à grenat associés à des lentilles d'élogites fraîches.

L'étude pression-température (P-T) d'élogites dans les deux unités dans le Limousin, révèle des cheminements progrades et rétrogrades différents. L'UI enregistre des conditions au pic de pression entre 650-700°C pour 23-28 kbar (~8°C/km) et les estimations rétrogrades indiquent une décompression à basse température, témoins d'une exhumation sans réchauffement. L'UGS montre des conditions de 640-675°C, 18-20 kbar (~10°C/Km) et 650- 755°C, 18-16 kbar (11-14°C/km) au pic de pression caractérisant des gradients géothermiques plus chauds que dans l'UI, suivi d'une décompression avec une température d'environ 100°C plus élevée. Le MCF se caractérise donc par deux unités métamorphiques de HP marquées par une évolution P-T différente qui pourrait refléter différentes thermicités et mécanismes lors des processus de subduction et d'exhumation.

La géochronologie U-Pb/Zr sur les deux élogites des deux unités révèle deux événements fini-Dévoïens pour la HP : 377 ± 2 Ma dans l'UGS, et 363 ± 7 Ma pour l'UI, ce qui est contemporain de la fusion partielle dans l'UGS. Les rutiles de l'élogite de l'UGS donnent un âge de 344 ± 6 Ma, indiquant un refroidissement de l'unité pendant le carbonifère supérieur. Ces âges et ceux obtenus récemment dans la littérature suggèrent que le métamorphisme de HP dans le MCF serait essentiellement Fini-Dévoïen.

Mots clés : Massif Central Français, élogite, métamorphisme haute-pression, subduction, exhumation.

*Intervenant



Evolution pression-température et implications des métamorphismes amphibolitique et éclogitique du Dévonien supérieur dans le sud du Massif Central Français (MCF)

Anissa Benmammar^{*1,2} ; Julien Berger¹; Antoine Triantafyllou^{3,4} ; Stéphanie Duchene¹;
Abderrahmane Bendaoud²; Jean-Marc Baele⁵; Olivier Bruguier⁶; Hervé Diot^{7,8}.

¹Géosciences Environnement Toulouse (GET), Université Paul Sabatier (UPS)-Toulouse III, CNES, CNRS : UMR5563, IRD : UMR239, Toulouse, France

² Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), LGGIP, Faculté des Sciences de la Terre et Aménagement du territoire, Alger, Algérie.

³ Université de Liège, département de Géologie, Sart Tilman, Liège, Belgique

⁴ University of Arizona, Department of Geosciences Tucson, USA

⁵ Université de Mons, département de géologie et géologie appliquée, Mons, Belgique

⁶ Université de Nantes, LPGN, UMR-CNRS 6112, Nantes, France

⁷ Université de La Rochelle, La Rochelle, France

Les unités tectono-métamorphiques du sud-ouest du MCF, dans l'ouest du Rouergue sont généralement incorporées dans le complexe leptyno-amphibolique, formant la base de l'Unité des Gneiss Supérieurs (UGS). Suite à une étude comparative de l'histoire métamorphique des unités de Najac et de Laguérie, deux unités tectono-métamorphiques peuvent être distinguées.

L'unité de Najac composée de métapélites de haute pression (HP), d'une intrusion basique-ultrabasique associée à des éclogites rétro-morphosées et des orthogneiss. Le grenat commence sa croissance vers 380°C/6-7 kbar, suivi d'un pic de pression à 16 kbar et 570°C et enfin d'une rétro-morphose dans le faciès schistes verts. L'âge du métamorphisme HP a été contraint récemment entre 383 et 369 Ma. L'Unité de Laguérie est formée par des amphibolites avec ou sans grenat renfermant des lentilles ou des veines de gneiss leucotonalitique. Les conditions P-T ont été estimées à 710°C et 10 kbar pour la fusion partielle suivie d'une rétro-morphose et une déformation dans le faciès amphibolites et schistes verts. Les datations U-Pb/Zr d'une veine de gneiss leucotonalitique donnent un âge de 363 ± 3 Ma, interprété comme l'âge de la fusion partielle de l'encaissant amphibolitique.

L'unité de Najac a enregistré la subduction d'une marge continentale au Dévonien supérieur. Elle peut être corrélée à un Allochtone Intermédiaire, compris entre l'Unité des Gneiss Inférieurs et l'UGS. Une telle unité intermédiaire est encore mal définie dans le MCF mais elle peut être un équivalent latéral des schistes bleus de Groix dans le Massif Armoricain. L'unité amphibolitique du Dévonien Supérieur de Laguérie est reliée en termes d'évolution P-T-t à l'UGS dans le MCF occidental. Ce métamorphisme au Dévonien tardif est contemporain d'un magmatisme de marge active et confirme que le sud du MCF appartenait à la nappe continentale supérieure d'un système de subduction océan-continent juste avant l'empilement des nappes durant le Mississippien.

Mot clés : Varisque, Rouergue, Métamorphisme HP, fusion partielle

*Intervenant



Ages U-Pb sur monazite des minéralisations Pb-Ag de Macôt-La Plagne et Peisey-Nancroix (Domaine Briançonnais, Alpes du Nord Françaises)

Maxime Bertauts ^{*1}, Emilie Janots ¹, Magali Rossi ², Isabelle Duhamel-Achin ³, Philippe Lach ³, Blandine Gourcerol ³, Valérie Magnin ¹

¹ ISTerre – Institut des Sciences de la Terre - France

² EDYTEM – Environnements DYNAMIques et TERRitoires de la Montagne – France

³ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

Macôt-La Plagne et Peisey-Nancroix furent les deux plus importantes mines des Alpes françaises. Ce sont des gisements polymétalliques de Pb-Ag à métaux de bases sulfurés, portés majoritairement par la galène et la tétraédrite-(Ag). Ces gîtes sont localisés dans une zone tectonique complexe de la zone briançonnaise externe (Alpes Internes), à proximité de grands chevauchements (nappe des Schistes Lustrés et Front Briançonnais Interne) et de nombreuses failles. La morphologie des gisements est principalement en amas et lentilles stratiformes encaissés dans des quartzites, schistes et cargneules du Permo-Trias. Les modèles minéralisateurs de ces deux mines emblématiques demeurent mal établis, en raison principalement du manque de données géochronologiques fiables. L'objectif de cette étude est d'évaluer le potentiel de la datation *in situ* U-Pb de monazite pour enregistrer les épisodes de minéralisations de ces deux gisements Pb-Ag.

Des études paragenétiques détaillées au microscope électronique à balayage ont permis de démontrer que la monazite est syngénétique des sulfures, par la présence de monazite en intercroissance avec les sulfures et la similitude des inclusions de phengite, quartz et florencite (un aluminophosphate de terres rares) dans la monazite et les sulfures. Les analyses à la microsonde électronique ont permis d'observer : (i) la contamination en Pb commun dans la monazite (plus importante vers la bordure) ; (ii) des zonations dans les grains de monazite de Peisey-Nancroix, avec un cœur de monazite-(Nd) enrichi en terres rares moyennes (environ 5wt% d'Eu), Ca, Th, Si et Y et une bordure de monazite-(Ce) enrichie en terres rares légères ; et (iii) une concentration en U élevée jusqu'à 1,2 wt%.

La datation U-Pb *in-situ* au LA-ICP-MS de monazite démontre sa fiabilité comme géochronomètre de gisements de Pb en contexte orogénique. L'âge obtenu pour le gisement de Peisey-Nancroix est de 34.9 ± 0.5 Ma ($n = 38$, MSWD = 2.1) et de 33.1 ± 3.25 Ma ($n = 17$, MSWD = 1.3) pour celui de Macôt-La Plagne. Ces âges autour de 34 Ma suggèrent que les deux gisements Pb-Ag étudiés se sont formés lors de l'orogénèse alpine conjointement à la mise en place du Front Pennique lors du chevauchement des zones internes sur les zones externes.

Mots-Clés : Datation, Monazite, Alpes, gisements



Prograde P–T evolution and partial melting of a Variscan high-temperature eclogite, French Massif Central, Haut-Allier

Luc de Hoÿm de Marien ¹, Pavel Pitra ^{*1,2}, Florence Cagnard ³, Benjamin Le Bayon ³,
JeanVan Den Driessche ¹

¹ Univ Rennes, CNRS, Géosciences Rennes - UMR 6118, Rennes, France

² Česká geologická služba, Prague, Czech Republic

³ Bureau de Recherches Géologiques et Minières – BRGM, Orléans, France

A detailed analysis of the petrographic relations and mineral chemical zoning combined with the use of calculated pseudosections is a powerful tool to unravel cryptic, yet important details of the P–T evolution of rocks, with a potential impact on the interpretation of the geodynamic context.

A mafic kyanite-bearing eclogite from the Haut-Allier displays garnet-rich layers that have intriguing similarities and differences with respect to the surrounding eclogites. Chemical zoning of garnet inside and outside the layers is similar, but the layers are enriched in rutile and ilmenite, and lack kyanite, common in the eclogite. Three successive metamorphic stages, M1, M2 and M3, are characterized by assemblages comprising garnet1-omphacite- kyanite, garnet2-plagioclase, and amphibole-plagioclase, respectively, and define a clockwise P–T path. These events occurred at the conditions of eclogite (M1; ~ 20 kbar, 650 °C to ~ 22.5 kbar, 850 °C), high-pressure granulite (M2; 19.5 kbar and 875 °C) and high-temperature amphibolite facies (M3; < 9 kbar, 750– 850 °C), respectively. Phase-diagram modelling of garnet growth zoning and mineralogy of the inclusions reveal a prograde M1 stage, first dominated by burial and then by near-isobaric heating. Subsequent garnet1 resorption, prior to a renewed growth of garnet2 is interpreted in terms of a decompression during M2. High- pressure partial melting is predicted for both the M1 temperature peak and M2, due to focussed influx of H₂O-rich fluids or external melts, probably associated with localized deformation. It is inferred that subsequent melt loss resulted in the formation of the garnet- rich layers. Despite the absence of clear accumulations of crystallised melts in the eclogite, high-pressure melting may be linked to the existence of HP trondhjemitic melts, described elsewhere in the Massif Central. M3 testifies to further strong decompression associated with limited cooling. The preservation of garnet growth zoning indicates the short-lived character of the temperature increase, decompression and cooling cycle. We argue that such P–T evolution is compatible with the juxtaposition of the asthenosphere against the subducted crust prior to exhumation driven by slab rollback.

Mots-Clés : eclogite, prograde PT path, HP melting, Massif Central, Variscan orogen



Finite pattern of Barrovian metamorphic zones: Interplay between thermal reequilibration and post/peak deformation during continental collision

Pavla Štípská ^{1,2*}, Karel Schulmann ^{1,2}, Martin Racek ³, Jean-Marc Lardeaux ^{4,2}, Bradley R. Hacker ⁵, Andrew R. C. Kylander-Clark ⁵, Robert Holder ⁵, Monika Košuličová ⁶

¹ Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Institut de Physique du Globe de Strasbourg – CNRS UMR7516, Université de Strasbourg, 1 rue Blessig, F-67084, Strasbourg Cedex, France, +333 68 85 05 62, stipska@unistra.fr; ² Center for Lithospheric Research, Czech Geological Survey, 11821 Praha 1, Czech Republic; ³ Institute of Petrology and Structural Geology, Charles University in Prague, Albertov 6, Praha 2, 12800, Czech Republic; ⁴ Géoazur - UMR 7329, Université Sophia-Antipolis, 250 Rue A. Einstein, Sophia-Antipolis, 06560 Valbonne, France; ⁵ Department of Earth Science, University of California, Santa Barbara, CA 93106, United States; ⁶ Regional Geology of Crystalline Complexes Department, Czech Geological Survey, 11821 Praha 1, Czech Republic

The Barrovian inverted metamorphism of the Svratka dome developed within two nappes derived from the Brunia continent that was thrust beneath the Moldanubian orogenic root. The metamorphism increases from biotite-chlorite zone in the basement to very closely spaced staurolite, kyanite and sillimanite zones at the top of the nappe pile. The sequence of mineral growth, chemical zoning of garnet, and pseudosection modelling indicate prograde paths from 4.5 kbar/510 °C to 5.5 kbar/540 °C in the garnet zone, from 6 kbar/530 °C to 7 kbar/600 °C in the staurolite zone, and from 3.5 kbar/510 °C to 8.5 kbar/650 °C in the kyanite zone. The age of monazite inclusions in garnet and staurolite are interpreted to reflect prograde metamorphism at 338±7 Ma and 336±7 Ma, respectively. An older matrix monazite crystal is interpreted as dating prograde crystallization at 345±7 Ma, whereas a younger monazite group records recrystallization at/or down to 334±7 Ma. While these petrological and geochronological data are consistent with data from an inverted metamorphic sequence of the southern Thaya dome, the spacing and distribution of metamorphic zones, nappe thicknesses, and late structures are different in the two domes. An antiformal stack of imbricated basement sheets and the extreme attenuation of metamorphic isograds at the top of the nappe pile in the Svratka dome is explained by a relatively cold overthrusting Moldanubian domain, formed mainly of middle orogenic crust. The homogeneous thickening of the hinterland-dipping basement duplexes and the regular spacing of metamorphic isograds in the Thaya dome are explained by a hot overriding Moldanubian domain, which in this region has a high proportion of exhumed lower orogenic crust and formed a hot mid- crustal channel.

Mots-Clés : Bohemian Massif, Inverted Barrovian metamorphism, Monazite dating, Imbricated antiformal stack, pseudosection modelling, channel flow



T1.9 Numerical modelling along active plate margins at different scales



Rotation, narrowing, and preferential reactivation of brittle structures during oblique rifting

Guillaume Duclaux ^{1,*}, Ritske S. Huismans ², Dave A. May ³

¹ Laboratoire Géoazur, Université Côte d'Azur, Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS, IRD, Nice – France

² Department of Earth Science, University of Bergen, Bergen – Norvège

³ Department of Earth Sciences, University of Oxford, Oxford – UK

Occurrence of multiple faults populations with contrasting orientations in oblique continental rifts and passive margins has long sparked debate about relative timing of deformation events and tectonic interpretations. Here, we use high-resolution three-dimensional thermo-mechanical numerical modeling to characterize the evolution of the structural style associated with varying geometries of oblique rifting in a layered continental lithosphere. Automatic analysis of the distribution of active extensional shear zones at the surface of the model demonstrates a characteristic sequence of deformation. Phase 1 with initial localization of deformation and development of wide moderately oblique en-échelon grabens limited by extensional shear zones oriented close to orthogonal to σ_3 . Subsequent widening of the grabens is accompanied by progressive rotation of the phase 1 extensional shear zones to an orientation sub-orthogonal to the plate motion direction. Phase 2 is characterized by narrowing of active deformation resulting from thinning of the continental mantle lithosphere and development of a second-generation of extensional shear zones. During phase 2 deformation localizes both on plate motion direction-orthogonal structures that reactivate rotated phase 1 shear zones, and on new moderately oblique structures parallel to σ_2 . Finally, phase 3 consists in the oblique rupture of the continental lithosphere and produces an oceanic domain where oblique ridge segments are linked with highly oblique accommodation zones. We conclude that while new structures form and trend parallel to σ_2 in an oblique rift, progressive rotation and long-term slip along phase 1 structures promotes orthorhombic fault systems, which accommodate upper crustal extension and control oblique passive margin architecture. The distribution, orientation, and evolution of frictional-plastic structures observed in our models consistent with documented fault populations in the Main Ethiopian Rift and the Gulf of Aden conjugate passive margins, both of which developed in moderately oblique extensional settings.

Mots-Clés : Oblique rifting, 3D numerical modelling, strain partitioning, transtension



Une promenade entre le manteau et la surface au Cénozoïque

Laurent Husson ^{1*}, Nicolas Coltice²

¹ ISTerre, CNRS, Université Grenoble-Alpes,
France² Laboratoire de Géologie, ENS, Paris

Les relations entre tectonique des plaques et convection mantellique sont souvent examinées de manière distincte, comme si elles avaient peu à voir. En réalité, il s'agit bien d'un système unique, puisque la tectonique telle que nous l'observons en surface témoigne des écoulements profonds. La cinématique des zones de convergence nous renseigne ainsi sur les processus profonds. En prenant appui sur des modèles numériques qui reproduisent la tectonique de surface et l'écoulement dans le manteau, nous pouvons examiner les relations entre le manteau et la surface en déformation. Nous proposons une exploration des grandes zones de convergence sur les derniers 70 Ma, par exemple des cordillères nord-américaines et andine, de l'Himalaya-Tibet, de l'Asie du Sud-Est. Le manteau, sous les zones de convergence, est bien évidemment loin d'être un acteur modeste. D'une part, les écoulements à grande échelle, c'est-à-dire celle de la Terre globale, déterminent les grands mouvements de convergence, que la lithosphère accompagne, en surface et en profondeur. A l'échelle de l'orogène, les lithosphères en subduction excitent à leur tour des courants plus locaux, modulent les champs de pression, et déterminent les hoquets des zones de convergence.

Mots-Clés : géodynamique, convection mantellique, tectonique



Oblique extension favours pulses propagation during continental break-up

Anthony Jourdon^{*1,2}, Laetitia Le Pourhiet², Frédéric Mouthereau¹, Dave A. May³

1- Géosciences Environnement Toulouse, Université Paul Sabatier, CNRS2- Institut des Sciences de la Terre de Paris, Sorbonne Université

3- University of Oxford, Departement of Earth Science

V-shaped oceanic propagators are widespread around the world. Their geometry combined with magnetic anomalies associated to their opening shows at first order that ridge propagation in the third dimension occurs by pulses. In this study we use 3D thermomechanical numerical models to show how oblique kinematic boundary conditions control both the intracontinental rift development and the oceanic ridge propagation. To do so, we apply a shortening velocity boundary condition in the direction perpendicular to the extension for “strong” and “weak” crustal rheologies. Numerical models results highlight that three ridge propagation modes can occur. For low out of plane velocities (12% to 15% of the extension rate), the ridge propagation is fast (>1.5 cm/yr) and straight. Higher shortening velocities (15% to 17%) lead to ridge propagation by pulses alternating between fast propagation (~1.5 cm/yr) and stalling phases. Finally, for higher velocities (17% to 20%) a ridge jump propagation mode occurs, localizing a new spreading centre between 100 and 200km far from the initial ridge. We also show that ridge propagation phases are associated with dip-slip dominated deformation while stalling phases are dominated by strike-slip deformation. These deformation regimes are marked by structures reorientation while kinematic boundary conditions remain constant. We discuss these results in term of plate tectonics reconstructions and regional geological studies.

Mots-Clés : 3D numerical thermomechanical modelling, V-shaped oceanic propagators, ridgepropagation, Oblique rifting, Plate tectonics



Régimes de contraintes et de déformations dans une plaque supérieure : Le cas de L'Iran.

Tiphaine Larvet ^{*1} - Laetitia Le Pourhiet ¹ – Philippe Agard ¹

¹ISTeP – Institut des Sciences de la Terre de Paris – France

Les limites de plaques sont matérialisées par des lignes sur les cartes géologiques mondiales. Cette représentation alimente une vision binaire de la tectonique des plaques : des plaques tectoniques rigides et des limites de plaques très étroites qui supportent toute la déformation. Cependant, si on regarde le taux de déformation actuel en chaque point du globe, on remarque que les zones de déformations (mouvement $> 3\text{mm/an}$) sont parfois très étendues. Dans le cas des zones de subduction, elles peuvent même atteindre plusieurs centaines de kilomètres. Sur la plaque supérieure de ces dernières, cette déformation se manifeste soit par la formation de structure compressive de type Orogénique, soit par la formation de structure extensive de type bassin d'arrière-arc. Les zones de subduction étant des zones de convergence entre deux plaques, la présence de structures compressives n'est pas étonnante. Cependant la question se pose alors pour les bassins. Comment expliquer une extension locale dans une zone globalement compressive ?

Pour suivre l'évolution des contraintes et de la déformation dans une plaque supérieure, nous avons mené, dans cette étude, une approche de modélisation numérique à l'aide du code thermomécanique Ptatin2D. Nous avons choisi ce code car il est basé sur la méthode des éléments finis et utilise une grille déformable (ALE). Ce type de grille a l'avantage de permettre de construire une topographie dynamique ce qui est particulièrement intéressant pour l'étude de la formation de bassin.

Ce code n'ayant jamais été utilisé pour modéliser une subduction, une phase préliminaire de l'étude a consisté à déterminer les paramètres nécessaires (résolution, Géométrie, structure thermique, rhéologie) pour obtenir une subduction stable dans le temps. Les premiers modèles ont été réalisés avec une plaque supérieure homogène et montrent qu'il est indispensable de prendre en compte l'impact des réactions métamorphiques sur la variation de densité des roches entrant en subduction.

Nous voulons maintenant étudier l'impact de l'héritage structural sur la déformation.

Pour définir le type d'héritage à modéliser, nous avons choisi l'Iran comme référence naturelle. Plusieurs tests sont réalisés afin d'évaluer les impacts de la présence d'une faille d'échelle crustale, d'une croûte partiellement épaissie ou amincie.

Mots-Clés : Subduction, Modèle Numérique, Iran



Latitudinal climate gradient co-determine the location of the Southern Andes volcanic arc

Veleda Astarte Paiva Muller ^{*1}, Pietro Sternai ¹, Christian Sue ²

¹ Department of Earth and Environmental Sciences, University of Milano-Bicocca, Milan – Italy

² Laboratoire Chrono-Environnement, Université de Franche-Comté, Besançon – France

The Southern Andes volcanic zone (SVZ) is an ~1500 km long chain of volcanoes, extending between 33°-46° S on the South American Plate, above the subducting Nazca Plate. In the northern segment (33°-42° S) the location of the SVZ matches that of the water divide between rivers flowing to the Pacific and Atlantic Oceans. In the south (42°-46°S), volcanoes are systematically to the west of the water divide, and closer to the trench. Changes in the geometry of the subducting slab, crustal thickness, and basement structures are amongst the main mechanisms that control this shifting. However, the role of precipitation and erosion gradients remains elusive. Westerly winds increase the precipitation rate on the western side of the orogen south of 35°S, and generate an erosion hotspot (0.75-1.75 mm/year) exactly where the volcanic arc migrates trenchward and westward with respect to water divide (42°- 46°S). We use thermomechanical visco-elasto-plastic numerical models to elucidate the relationship between the trans-lithospheric migration and intrusion of melts into the crust, associated extensional deformation, and volcanism, accounting for the landscape evolution in response to erosion gradients. The modeling results show that leeward migration of the topographic barrier due to enhanced erosion upwind enhances asymmetric slip along normal faults, forcing the magma migration path toward the upwind side of the orogen. Latitudinal climate trends may thus affect the magma migration path, thereby setting the location of volcanic activity. Therefore, the SVZ testifies a novel example of climatic– tectonic interactions on Earth.

Mots-Clés : Andes, volcanism, active margins, deformation, geodynamic modeling



How many subduction in the Variscan orogeny? Insights from numerical models

Alessandro Regorda ^{*1}, Jean-Marc Lardeaux ², Manuel Roda ¹, Anna Maria Marotta¹, Maria Iole Spalla ¹

¹ Department of Earth Sciences, Università degli Studi di Milano - Italy

² UMR Géoazur, Université Nice Sophia-Antipolis - France

The Variscan belt is the result of the Pangea accretion, a prominent feature of the European continental lithosphere (von Raumer et al., 2003). The debate on the number of oceans and subduction systems that have been active during mountain building is still open (Faure et al., 2009; Franke et al., 2017). Two scenarios concerning the geodynamic evolution of the Variscan belt have been proposed:

- 2) Monocyclic scenario: this geodynamic reconstruction assumes a single long-lasting south- dipping subduction of a large oceanic domain. For some authors Armorica remained more or less closed to Gondwana during its northward drift, in agreement with the lack of biostratigraphic and paleomagnetic data that suggest a short-lived narrow oceanic domain (lesser than 500-1000 km; Matte, 2001; Faure et al., 2009; Lardeaux, 2014);
- 3) Polycyclic scenario: this geodynamic reconstruction envisages two main oceanic basins opened by the successive northward drifting of two Armorican microcontinent and closed by opposite subductions (Lardeaux, 2014; Franke et al., 2017). The northern oceanic basin is identified as the Saxothuringian ocean, while the southern basin can be identified as the Medio-European ocean (Lardeaux, 2014). The width and the duration of the Medio- European oceanic domain are debated due to discrepancies between metamorphic and paleo-geographic data.

Models of single and double subduction have been developed to verify which scenario better fit with Variscan P-T evolutions from the Alps and the French Central Massif (FCM). From the comparison between model predictions and natural Variscan P-T-t estimates results that data from the Alps with high P/T ratios and accurate radiometric ages better fit with the double subduction model, supporting that a polycyclic scenario is more suitable for the Variscan belt evolution. On the other hand, data of the FCM with high P/T ratios that fit with both single and double subduction models have poorly constrained geological ages and, therefore, are not suitable to discriminate between mono- and polycyclic scenarios. Moreover, considering the FCM, the predictions of the models open to the possibility that rocks of the Upper Gneiss Unit could derive from tectonic erosion of the upper plate and not only from the ocean-continent transition of the lower plate (Regorda et al., 2020).

Mots-Clés : Numerical modeling, Variscan orogeny, double subduction



T1.10 Processus de rifting et formation des marges passives : géodynamique, cinématique, tectonique, stratigraphie et géomorphologie



Héritage Permien dans les Alpes du Sud – Expression d’une dynamique tectonique et magmatique dans les séries pélitiques et gréseuses du Dôme du Barrot (France)

Grégoire Arnal ¹, Barbara Roule-Chenieux ¹, Sophie Leleu ¹, Benoît Issautier ²,
Julie Champagne ³, Aurélien Bordenave ^{1,3}

¹ EA 4592/ Bordeaux-INP - France

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

³ AGeos/ Bordeaux-INP /ADERA - France

Les bassins permien ouest-européens forment des bassins très épais mais sont peu visibles à l’affleurement. Ainsi leur remplissage est méconnu et les processus d’ouverture restent débattus. Les pélites permien du Dôme du Barrot forment des affleurements exceptionnels et imposants, qui permettent de reconstituer la dynamique sédimentaire du bassin et le contexte tectonique, dans lequel la lithosphère est chaude et la production magmatique soutenue.

La succession sédimentaire étudiée est constituée d’une série pélitique très épaisse (<450 m) et monotone (Fm du Cians) surmontées par des unités silto-gréseuses (Fm de la Roudoule et Fm de Léouvé) qui varient d’épaisseur (<200 m) sous la discordance du Trias gréseux. Grâce à l’utilisation conjointe du MNT, des orthophotos IGN et d’un modèle photogrammétrique acquis par drone en mai 2021, l’analyse des géométries sédimentaires a été possible avec l’aide du logiciel VRGS, et a été complétée par des données de terrain.

La Fm du Cians est pélitique mais contient également des rhyolites et des carbonates très locaux. La Fm de la Roudoule est une unité pélitique volcano-sédimentaire contenant des ponces, quelques rhyolites et péperites. La Fm de Léouvé se compose de faciès variés : chenaux divers, lobes fluviaux et faciès lacustres.

Des discordances majeures ainsi que des géométries sédimentaires internes dans les différentes formations sont tracées. Certaines unités sont même totalement absentes sous le Trias. Des failles normales semblent avoir joué à plusieurs reprises créant de la fracturation, surimposée par des déformations alpines.

Ainsi le remplissage de ce bassin permien a une histoire polyphasée et complexe dont les déformations syn-sédimentaires sont explicitées dans ce projet. Une partie des déformations peut être liée à l’activité volcanique relativement intense à cette période dans les régions voisines telles que l’Esterel/ Tanneron, voire plus au Sud, mais également dans le Massif de l’Argentera.

Mots-Clés : rifting permien, fluvio-lacustre, volcano-sédimentaire, biseaux, discordances, failles, fracturation



Space-time partitioning of the Mesozoic deformation along the Iberia/Eurasia diffuse plate boundary

Riccardo Asti^{1*}, Paul Angrand², Nicolas Saspiturry³

1) Univ Rennes, CNRS, Géosciences Rennes, UMR 6118, Rennes, France

2) Geosciences Environnement Toulouse (GET), Université de Toulouse, UPS, Univ. Paul Sabatier, CNRS, IRD, Toulouse, France

3) Université Bordeaux Montaigne / EA 4592 Géoressources & Environnement, Bordeaux, France

Since the 1970s, the Mesozoic kinematic evolution of the Iberian plate has been largely debated. In particular, no consensus exists on the timing, kinematics and partitioning of the deformation along the Iberia/Eurasia plate boundary during the Late Jurassic-Early Cretaceous. Most of the plate kinematics models suggest that this plate boundary must have accommodated ~400 km of left-lateral displacement between the two plates in this time lapse. However, no field evidence exists for a narrow transform plate boundary that could have accommodated such displacement. In the last decade, several authors have tried to partition this deformation between two/three transtensional corridors centered in the Pyrenean realm, but still without resolving the discrepancy between postulated and observed displacement. In this work, we propose a reappraisal of the Mesozoic Iberia/Eurasia plate boundary by reviewing the tectonic and kinematic evolution of the numerous rift basins located between the Iberian Chains System (to the S) and the Armorican Shelf/Northern Aquitaine System (to the N). This allows to define the transition between the two plates as a

~400 wide NW-SE trending diffuse plate boundary across which the deformation is partitioned. Its polyphased evolution consists of four main steps: i) a Late Jurassic phase of left-lateral transtension localized at the northern and southern boundaries of the system, while the rest of the rift basins underwent orthogonal rifting; ii) a Neocomian phase of tectonic quiescence; iii) a Barremian-Aptian phase of diffuse left-lateral transtensional rifting, while the North Pyrenean Rift System underwent orthogonal rifting; iv) an Albian- Cenomanian phase of transtension localized along the Basque-Cantabrian/North Pyrenean corridor, following the onset of oceanic spreading in the Bay of Biscay margins, while the rest of the rift basins underwent post-rift stage. Finally, we discuss the role of structural inheritance and pre-rift salt in favoring distributed rather than localized deformation at the plate boundary. This review allows to make inferences on the timing of rotation of Iberia during the Mesozoic and to highlight the contribution to the evolution of the plate boundary of some domains within the Cenozoic foreland basins of the Pyrenees which have been often disregarded.

Mots-Clés: Iberia/Eurasia plate boundary Diffuse plate boundary, Pre-rift inheritance Orthogonal vs. oblique rifting



Along-strike structural variability of the Eastern Red Sea continental passive margin

Guillaume Baby^{1*}, Abdulkader Afifi¹, Antoine Delaunay¹, Jing Ye¹, Jakub Fedorik¹

1. King Abdullah University of Science and Technology, Saudi Arabia

The nature of the lithosphere under the Red Sea is still poorly understood. Field observations show unequivocally that the conjugated margins are continental. Offshore, bathymetric data revealed a central trough in the middle and south of the Red Sea where oceanic crust is exposed. Based on these observations the current consensus is that the lithosphere beneath the Red Sea is predominantly thinned continental crust with a young oceanic crust (< 5 My) restricted to the central trough in the south. This commonly accepted view was challenged by Tapponier et al. in 2013 (AGU, fall meeting 2013) who showed on the basis of a new geophysical survey from the industry that at least 2/3 of the width of the Red Sea is floored by oceanic crust.

Based on the same survey (seismic, wells, potential field data) and field observations (mainly from satellite images) along the Arabian side of the Red Sea we mapped the distinct structural domains (continental and oceanic domains) and described in detail the geometry of the inner part of the margin (continental domain) from Sinai to Aden. The most striking results are (1) that the Red Sea is neither a rift nor a transitional system but a mature passive margin on its entire length which began to subside thermally ~ 13 My ago; (2) the characterization of a gradual increase in magmatic activity to the south during the syn-rift stage (~ 25-13 Ma) without significant segmentation of the margin along strike. To the North, the margin is characterized by magma-poor-type margin features with seaward dipping normal faults detached in the middle crust and a syn-rift sedimentation siliciclastic dominated. To the South (south of 22N), the margin presents volcanic-type features with landward dipping normal faults and seaward dipping reflectors. These observations suggest that the Red Sea is a particularly suitable place to better understand rift systems with lateral changes in thermal state.

Keywords: Red Sea, structural domains, magma rich vs magma poor passive margin



Enregistrement contrasté de circulations de fluides dans deux zones de détachement océaniques jurassiques, Alpes suisses

Philippe Boulvais^{*1}, Rémi Coltat¹, Yannick Branquet^{1,2}, Pierre Gautier¹,
GianretoManatschal³

1 Géosciences Rennes, Université de Rennes 1,
France2 ISTO, Université d'Orléans, France
3 EOST, Université de Strasbourg, France

L'exhumation des roches du manteau dans les marges hyper-étendues jusqu'aux environnements océaniques de dorsales (ultra)lentes s'accompagne d'une serpentinisation pervasive, contrôle pour partie de la composition des réservoirs océaniques et mantelliques, des propriétés mécaniques et géométriques des structures extensives, des flux de chaleur et de matière, y inclus la genèse de gaz abiotes (H₂, CH₄). La serpentinisation est prise en relai au cours de l'exhumation par une carbonatation, processus de captage de CO₂ par les roches exhumées.

Les chaines de montagne offrent à l'observation des structures exposant ces processus d'interactions fluide-roche-déformation océaniques. C'est le cas en particulier des Alpes suisses, canton des Grisons, où la déformation compressive alpine et le métamorphisme associé n'ont eu que peu d'empreinte sur les objets extensifs jurassiques. Deux superbes zones de déformation extensives sont exposées dans les sites de Tasna et de Falotta. Chacune est décrite comme une zone de détachement de marge hyper-étendue, où le manteau exhumé en fond de mer jurassique a été serpentinisé, puis carbonaté. Les compositions isotopiques en oxygène de la calcite des roches carbonatées (ophicalcites, basaltes carbonatés, zones de cisaillement) sont distinctes dans les deux cas, bien que ces roches soient d'aspect pétrographique comparable. A Tasna, le long du plan de détachement, les compositions isotopiques en oxygène augmentent progressivement depuis les zones profondes ($\delta^{18}\text{O} = 13$ ‰) vers l'ancien fond de mer ($\delta^{18}\text{O} = 26$ ‰). A Falotta, les compositions sont homogènes ($\delta^{18}\text{O} = 16$ ‰), signe de conditions uniformes de carbonatation (température de ~100°C, carbonatation brutale).

De prime abord comparables, les deux mega-structures extensives jurassiques alpines ont donc enregistré des conditions d'interaction fluides-roches-déformations singulières : si la carbonatation à l'affleurement de Tasna enregistre la dilution progressive des fluides issus de la serpentinisation par l'eau de mer sus-jacente pendant le fonctionnement du détachement, l'affleurement de Falotta présente un exemple rare de carbonatation à l'interface serpentinites-basaltes, postérieure au fonctionnement du détachement océanique, synchrone de la réactivation en décollement de cette interface, en contexte extensif toujours.

Mots-Clés : mantle exhumation, detachment, carbonation, stable isotopes, Alps



Evolution d'un rift actif en limite de plaques Eurasie-Egée diffuse et dans le prolongement de la Faille Nord-Anatolienne (projet WATER)

Fabien Caroir^{1*}, Frank Chanier¹, Virginie Gaullier¹, Julien Bailleul², Agnès Maillard³, Fabien Paquet⁴, Dimitris Sakellariou⁵, Olivier Averbuch¹, Jacky Ferrière¹, Fabien Graveleau¹, Louise Watremez¹

1 : Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, F59000 Lille -- France

2 : Bassins Réservoirs Ressources (B2R) – Institut UniLaSalle Beauvais -- France

3 : Géosciences Environnement Toulouse (GET) – Institut de Recherche pour le développement, Univ.

Paul Sabatier – Toulouse 3, Observatoire Midi-Pyrénées, CNRS : UMR 5563 -- France

: DGR-GBS – Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) -- France

5 : HCMR, Hellenic Centre for Marine Research, Anavyssos -- Grèce

L'extension de la Plaque Anatolie-Egée au-dessus de la subduction de la lithosphère africaine sous les Hellénides est classiquement associée au retrait de ce panneau plongeant. Cette extension accompagne depuis le Pliocène l'extrusion vers l'ouest de la plaque Anatolie- Egée dont le coulisement est guidé par la Faille Nord-Anatolienne. Le rift Sperchios - Golfe Nord Eubée, orienté WNW-ESE, accommode une partie de cette extension qui est active au minimum depuis le Pliocène jusque l'actuel. Ce rift, ainsi que l'Ile d'Eubée, ont subi une rotation horaire de l'ordre de 15° par rapport à l'Eurasie fixe depuis l'initiation du rifting il y a environ 3 Ma.

La campagne à la mer WATER (Western Aegean Tectonic Evolution and Reactivations), réalisée en juillet-août 2017 à bord du N/O « Téthys II », a permis d'acquérir plus de 1300 km de profils de sismique réflexion très haute résolution de type Sparker (50-300 joules) à travers l'ensemble du Golfe d'Eubée, le chenal d'Oreoi, et le sud des Sporades, en Grèce.

L'interprétation des données sismiques nous a permis de préciser les caractéristiques géométriques et chronologiques de la déformation du rift du Golfe Nord-Eubée. Ces résultats mettent en évidence trois directions de failles normales, NW-SE, WNW-ESE et NE-SW. À partir de la chronologie des failles identifiées à terre et en mer et des vitesses de rotation déduites des données publiées, nous proposons un nouveau modèle chronologique de l'évolution du rift et des domaines environnants. Ce modèle propose un développement structural du domaine Nord Eubée contrôlé par une extension de direction globalement Nord-Sud constante pour les derniers 3 Ma. Les rotations progressives de l'ensemble du domaine seraient responsables d'une part, de l'ouverture du Chenal d'Oreoi en association avec la formation de failles normales transverses, orientées NE-SW, et d'autre part des variations de direction des zones de failles qui apparaissent au sein du rift et sur ses bordures. L'origine de ces rotations, les effets d'héritages structuraux successifs, et l'influence de la Faille Nord-Anatolienne dans l'évolution du domaine seront aussi discutées.

Mots-Clés : Rift du Golfe Nord-Eubée – Tectonique – Sismique THR – Domaine égéen – Faille Nord-Anatolienne



New megasequences cutting of seismic reflection interpretation in Gabes-Tripoli offshore basin/ SE Tunisia : rift to post-rift evolution

Yosra Chatti ^{*1}, Kais Aridhi ², Selma Ben Haj Slama ³, Ali Mahroug ³

1 Sedimentary Basin and Petroleum Geology laboratory (Lab SBPG) and Geodynamic, Geomaterial and Geodigital laboratory (Lab 3G) – Geology departement , University of tunis El Manar – Tunisia

2 Geodynamic, Geomaterial and Geodigital laboratory (Lab 3G) – Geology departement , University of tunis El Manar – Tunisia

3 Tunisian Company of Petroleum Activity (ETAP) - Tunisia

The Gabes-Tripoli basin was initiated during late triassic-Early jurassic as a left-lateral pull- apart basin by the reactivation of WNW trending Hercynian fault systems.

Since the Gabes-Tripoli basin architecture and its depositional sequences are extended toward the libyan offshore the model of tectonic and structural architecture proposed in the tunisian part became correlable with the regional geology of the North Libyan offshore which is closely related to the evolution of the intra-continental Sirt basin, the Tethys and the dynamics of the African and Eurasian plates.

The interpretation of the seismic profiles covering the Gabes-Tripoli offshore basin in the Tunisian part shows that in the late Triassic-early Jurassic the distension (linked to the evolution of the Tethys ocean) generated half-grabens and horst limited by normal faults in the NS direction, NW-SE and EW which affect; probably the late Jurassic and all the cretaceous sequences also control the thickness and lateral variation of facies.

Indeed, this study consists in subdividing the whole sedimentary succession into tectonostratigraphic megasequences, which are linked in one way or another to regional tectonic episodes.

As a result, mainly two sedimentary megasequences were recognized in the Gabes-Tripoli basin:

-Syn-rift megasequence : The depositional sequences of the syn-rift phase includes the upper and the lower cretaceous which were deposited within the half-grabens with an important syn-sedimentary control visible by changes in the dip of the reflectors of the upper cretaceous, the onlap terminations (showing discordances), and probably re-worked facies.

-Post-rift megasequence : represented by the paleocene and eocene series. The lower boundary of the post-rift megasequence is represented by the paleocene sediments and the sealing of the basin took place during the Upper Eocene when volcanic activity ceased and the rift was aborted.

Key words : seismic interpretation, geodynamic context, Gabes-Tripoli basin, megasequences, syn-rift, post-rift.



The Mont-Blanc detachment fault: An example of fluid circulation associated with the necking of the crust in the magma-poor Alpine Tethys margin

Nicolas Dall'asta^{*1}, Guilhem Hoareau¹, Gianreto Manatschal ², Charlotte Ribes³

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS, LFCR-France

² Université de Strasbourg, CNRS, ITES UMR 7063, Strasbourg F-67084, France

³ TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – France

During rifting, important thinning of the crust (from 30 km to less than 10 km) occurs in areas of limited spatial extent called necking zones. Despite numerous seismic observations on modern passive margins, the tectono-sedimentary and fluid evolution recorded in the necking zones remain poorly understood. Recent studies demonstrate that well-preserved fossil necking zones can provide more precise constraints on this evolution (Ribes et al., 2020). Many questions remain concerning the nature of fluids, the thermal evolution and the link to large-scale hydrothermal systems and the impact of element transfer on the diagenesis of syn-rift sediments?

Here we focus on the southern Mont-Blanc massif (Col du Bonhomme, Catogne), which preserves sediments from the rifting phase, (from late Triassic / early Jurassic to late Jurassic), but also detachment faults associated with the necking of the crust (Ribes et al.

2020). The necking occurred during Sinemurian to Pliensbachian. It was associated with deposition of detrital sandstones called "Grès Singuliers", which correspond to the autochthonous cover, and were recently reinterpreted as being closely associated with detachment faults responsible of the exhumation and uplift of the basement during the necking phase (Ribes et al. 2020). These outcrops, which are unique in the Alps, gives the opportunity to study in detail the fluid circulations associated with detachment faults in the necking zone.

Characterization of the detachment faults and overlying rocks requires a multi-scale and multi-disciplinary approach combining field observation, petrography, sedimentology, structural geology, and geochemistry. Preliminary observations indicate that at the outcrop scale, the fractured basement passes to cataclasites and black gouges forming the core zone of the detachment. Injections of gouge material in the surrounding rocks indicate focused fluid flow during deformation. Liassic sandstones lie above the detachment fault with a conformable contact and contain reworked fault rocks (clasts of cataclasite).

At the thin section scale, cataclasites are observed. They are made of quartz, K-feldspars, with secondary pyrites. Feldspars were strongly sericitized during deformation. These cataclasites are reworked in the black gouge, which formed at crustal level below 5 km. Quartz-Hyalophane veins, typical of low-P hydrothermalism, are found in the gouge. They are locally sheared by the gouge, and thus might be contemporaneous to the detachment.

Important silicification is also indicative of an important transfer of silica along the faults.

These first observations suggest that the Mont-Blanc detachment was a major structure during rifting and formed an important pathway for crustal fluids, that still need to be characterized in more detail. Understanding the fluid circulations in the necking zone in terms of thermicity and composition and its link to element transfer, early diagenesis and maturation of reservoir and source rocks from the syn-rift sediments and possible enrichment in metals is a key point for future works concerning hydrothermalism during the necking of the crust.

Keywords : Detachment fault, Mont-Blanc massif, Alpine Tethys, Necking zone, Fluid circulation, Grès Singuliers.



Structure and morphology of the Mid-Ocean Ridge in the Red Sea

Antoine Delaunay^{1*}, Abdulkader Afifi¹, Guillaume Baby¹, Jakub Fedorik¹, Paul Tapponnier², Jérôme Dymant³

1. King Abdullah University of Science and Technology, Saudi Arabia
2. National Institute of Natural Hazards, China
3. Institut de Physique du Globe de Paris, France

Our presentation describes the structures and morphologies associated with seafloor spreading in the Red Sea inferred from bathymetric, gravity, magnetic and unpublished seismic data. We show that it is consistent with an Arabia-Nubia Euler pole located within the 95% confidence of Ar-Rajehi et al, (2010) Euler pole and the tectonic model initially proposed by Girdler (1984). At the Red Sea scale, our model shows that a spreading axis extends along most of its length, even though it is mostly covered by allochthonous Middle Miocene salt and Late Miocene minibasins originally on the Red Sea margins. In the northern Red Sea, oceanic basement is only exposed through small windows within the salt, forming a series of deeps. The seafloor segments symmetrically bisect the new ocean in the south, progressively becoming more oblique towards the Sinai triple junction. Right-stepping transform faults that cluster near Jeddah, Zabargad and Ikhwan Islands offset the ridge axis as spreading is getting more oblique towards the Euler Pole. The southern and central Red Sea segments display a well developed mid-ocean ridge flanked by landward-dipping volcanic basement, typical of slow spreading ridges. There is no such ridge in the north, where basement is flat and deep along the ultra-slow, magma poor spreading segment, and where mantle exhumation is likely. Transpression and transtension along transform faults accounts for the exhumation of the mantle on Zabargad Island as well as the collapse of a pull-apart basin in the Conrad deep.

We hereby propose a brand new structural model for the Red Sea and discuss the effect of the Danakil microplate on the ridge morphology. We finally show that the Arabia-Nubia-Danakil triple junction is around 18°N, further north than previously described.

Keywords: Red Sea, Tectonic, Mid-Ocean Ridge, Geodynamic, Oceanic Crust, Transform Faults, Rifted Volcanoes



Formation de la zone de necking du rift pyrénéen par localisation de la déformation ductile (Massif de l'Agly)

Yoann Denèle ^{*1}, Martin Motus ¹, Frédéric Mouthereau ¹, Elise Nardin ¹,
Patrick Monié², Quentin Roux¹

¹ Géosciences Environnement Toulouse, Université de Toulouse, CNRS, IRD, UPS, CNES, F-31400 Toulouse, France

² Géosciences Montpellier, Université de Montpellier, CNRS, Université des Antilles, Montpellier, France

La Zone Nord-pyrénéenne est constituée par une alternance de massifs de socle (« Massifs Nord-Pyrénéens ») ayant subi l'orogénèse varisque, et de roches sédimentaires mésozoïques associées à des massifs de péridotites qui sont les marqueurs de l'exhumation du manteau lors du rifting pyrénéen à l'albo-cénomaniens. Si la connaissance de l'évolution de ce système de rift a grandement évolué ces dernières années, la quantité de déformation ductile (interne) subie par les Massifs Nord-pyrénéens lors du rifting reste une question ouverte, qui constitue un verrou important pour proposer un modèle intégré du rifting pyrénéen, et plus largement pour améliorer la compréhension des processus menant à la rupture continentale.

Le Massif Nord-pyrénéen oriental de l'Agly est composé d'un ensemble précambrien gneissique à granulitique (croûte moyenne varisque), associé à des unités paléozoïques micaschisteuse, schisteuse et granitique (croûte supérieure varisque). Les domaines de croûte moyenne enregistrent une déformation cisailante post-métamorphe intense ayant eu lieu en régime extensif et dont l'âge est débattu. Nous avons réalisé une étude de ce massif de socle et de sa couverture à partir de données tectoniques, pétrostructurales, microstructurales, sédimentologiques ainsi que des datations Ar-Ar sur biotites des zones de cisaillement. La représentation 3D du champ de déformation, l'intégration de l'évolution thermique et des systèmes fluides dans les différentes unités ainsi que l'étude d'un système de brèches en partie associé à une remobilisation des évaporites du Keuper au niveau des interfaces socle- couverture a permis d'identifier dans le massif de socle: (i) des reliques de déformation varisque ; (ii) une déformation majeure syn-rift qui est compatible avec celle identifiée dans la couverture, (iii) l'impact de la déformation syn-orogénique pyrénéenne de type « thick- skinned ».

La restauration de la marge montre que le rifting créacé dans les Pyrénées orientales est marqué premièrement, par une localisation de la déformation ductile au niveau de la croûte moyenne de la zone de necking (ca.125 Ma) et deuxièmement, par une extension asymétrique contrôlée par la formation d'un détachement majeur menant à l'exhumation du manteau (période 125-115 Ma). La localisation de la déformation puis la transition rhéologique de la zone de necking matérialisée par un partitionnement puis un couplage de la déformation est contrôlée par l'héritage. Nous montrons l'impact de la présence d'un niveau pré-rift kilométrique d'évaporites et de l'alternance dans la croûte supérieure de domaines métasédimentaires localisant la déformation et de socles granitiques résistants. Ce mode de déformation semble également contrôlé par l'absence de croûte inférieure mafique dont l'origine pourrait être liée aux phénomènes de délamination qui affecte le domaine externe méridional de la chaîne Varisque à la transition Carbonifère/Permien.

Mots-Clés : Rift, zone de necking, localisation de la déformation, héritage, Massif de l'Agly.



L'interface basaltes - manteau serpentinisé en domaine océanique : les leçons d'une coupe dans les Alpes suisses

Pierre Gautier ^{*1}, Rémi Coltat ¹, Yannick Branquet ^{1,2}, Philippe Boulvais ¹,
Gianreto Manatschal ³

¹ Géosciences Rennes, Université de Rennes, France

² ISTO, Université d'Orléans, France

³ IPGS/EOST, Université de Strasbourg, France

La présence de basaltes coiffant le manteau serpentinisé est un fait assez commun en domaine océanique, au niveau des dorsales (ultra-)lentes et dans la partie la plus distale des marges pauvres en magma. Cette interface entre basaltes et manteau, subhorizontale à faiblement inclinée et imagée par la géophysique, fait l'objet de deux interprétations. Selon l'une d'elle, il s'agit d'un contact discordant : l'interface représente un ancien fond marin sur lequel les basaltes sont venus s'épancher. Dans la seconde interprétation, plus récente, le contact est tectonique et correspond à une faille de détachement extensive. Toutes les études des séries ophiolitiques exhibant à terre ce type d'interface ont conclu en faveur de la première interprétation, y compris dans des situations où l'existence d'un détachement extensif est avérée ou probable. A chaque fois, l'argument-clé est la présence, à la base de la série volcanique, de brèches sédimentaires remaniant les serpentinites. De plus, ces brèches et le sommet des serpentinites sous-jacentes montrent fréquemment les effets d'une carbonatation pervasive qui les a transformés en opicalcites. L'interaction entre eau de mer et roches mantelliques produisant la carbonatation est classiquement considérée comme s'effectuant au niveau du plancher océanique, ce qui semble renforcer l'hypothèse d'une mise en place plus tardive, en discordance, des épanchements basaltiques. Les modèles évolutifs proposés dans la littérature considèrent tous qu'une fois la discordance établie, l'interface basaltes-serpentinites n'est plus active, ni tectoniquement, ni du point de vue de la circulation des fluides, tout du moins jusqu'à l'éventuelle période orogénique subséquente.

Une telle interface basaltes-manteau serpentinisé est exposée le long d'une coupe continue de 350 m au niveau du site de Falotta, dans les Alpes suisses (Nappe de Platta, Canton des Grisons). Notre étude montre que le contact ne correspond ni à une discordance 'statique' ni à un détachement, mais à une discordance ayant été activée en décollement au cours de la tectonique extensive. La déformation s'exprime par une série de zones de cisaillement conjuguées localisées le long de l'interface, sur une épaisseur de 20 à 40 m, associées à une intense carbonatation. Le développement syn-cinématique des opicalcites, ainsi que d'autres arguments, permettent d'exclure un lien avec la déformation orogénique alpine. Les failles normales recoupant les basaltes s'enracinent sur les zones de cisaillement ; la déformation cisailante elle-même et la carbonatation associée affectent l'extrême base des basaltes (sur ≤ 2 m d'épaisseur => difficile à 'traquer' en milieu océanique actuel), ce qui montre que les basaltes ne sont pas postérieurs à cette déformation. L'essentiel de la carbonatation s'est ainsi développé sous la couverture basaltique et non au plancher marin. L'activation de l'interface basaltes-serpentinites en zone de décollement a pu être facilitée par le fait que la discordance correspondait à une zone de forte perméabilité (présence de brèches sédimentaires), permettant une localisation de la circulation des fluides. L'interface basaltes-serpentinites peut ainsi constituer un niveau de découplage mécanique venant s'ajouter aux niveaux de découplage plus profonds de la (proto-)lithosphère océanique (front deserpentinisation, front de percolation magmatique diffuse). Une telle situation est ici identifiée dans la partie ultra-distale d'une marge continentale (cas de la Nappe de Platta) mais peut probablement se retrouver aussi au niveau des dorsales océaniques lentes.

Mots-Clés : extension, fluides, carbonatation, décollement, niveau de découplage, Platta



Relations génétiques entre la Ride d'Aves et le bassin arrière-arc de Grenade, Caraïbe orientale

Clément Garrocq¹, Serge Lallemand¹, Boris Marcaillou², Jean-Frédéric Lebrun¹,
Crelia Padron^{3,4}, Frauke Klingelhofer⁴, Mireille Laigle², Philippe Münch¹,
Aurélien Gay¹, LaureSchenini², Marie-Odile Beslier², Bernard Mercier de Lépinay²,
Frédéric Quillévéré⁵, Marcelle Boudagher-Fadel⁶ et l'équipe scientifique de la
mission GARANTI

¹ Géosciences Montpellier, Université de Montpellier, Université des Antilles, CNRS – France

² Géoazur, Université Côte d'Azur, CNRS, IRD, OCA – France

³ Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad Simón Bolívar – Venezuela

⁴ Géosciences Marines, Ifremer – France

⁵ LGLTPE, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS – France

⁶ University College London – Royaume-Uni

Le bassin de Grenade sépare aujourd'hui l'arc actif des Petites Antilles et la Ride d'Aves, communément décrite comme un segment éteint du «Grand Arc de la Caraïbe» d'âge Crétacé-Paléocène. De nombreux modèles tectoniques impliquant différents modes de rifting ont été proposés pour la formation de ce bassin, sans qu'aucun d'entre eux ne parvienne à s'imposer en tant que modèle de référence. Les données sur lesquelles ces modèles s'appuient offrent qu'une vision partielle de l'architecture du bassin de Grenade et de ses marges, créant ainsi une ambiguïté quant à son origine et ses relations avec les arcs adjacents.

Nous présentons ici des données de sismique réflexion multi-trace acquises lors de la campagne GARANTI en 2017 (supportée par l'ANR GAARANTI, ANR-17-CE31-0009), combinées avec des données publiées incluant des forages, des données sismiques grand-angle et des dragages. Nos observations offrent une meilleure compréhension de la structure du socle, de l'histoire des dépôts, de la déformation tectonique et des mouvements verticaux dans le bassin de Grenade et sur ses marges, comme suit :

- 1) à la transition entre la Ride d'Aves et le bassin de Grenade, l'essentiel de la déformation est guidé par un système de décrochements conjugués N30° et N135° mis en place au Paléocène, facilitant ensuite l'initiation du rifting arrière-arc à l'Eocène inférieur ;
- 2) la croûte océanique au sud-est du bassin de Grenade a été formée à l'Eocène moyen, le long d'un ou plusieurs axes d'expansion probablement orientés NE-SW ;
- 3) l'asymétrie des dépo-centres pré-Miocène soutient l'hypothèse selon laquelle le sud du Bassin de Grenade s'étendait à l'origine sous l'arc actuel, et même probablement jusque dans l'avant-arc actuel, avant le début de l'intrusion de l'arc des Petites Antilles à ~38 Ma ;
- 4) la Ride d'Aves et le Bassin de Grenade ont subsidé de manière concomitante et quasi-continue depuis au moins l'Eocène moyen, avec un ralentissement général de la subsidence voire un soulèvement entre l'Eocène supérieur et l'Oligocène, puis une forte accélération de la subsidence sur le flanc sud-est de la ride au Miocène supérieur ;
- 5) la construction récifale compensant la subsidence, plusieurs points hauts de la Ride d'Aves ont pu rester sub-émergés jusqu'au Miocène moyen.

Mots-Clés : Bassin de Grenade, Ride d'Aves, Petites Antilles, sismique réflexion, bassin arrière-arc, Caraïbes



The role of segmented magma-rich rifted margins in convergent settings: insights from the Demerara Plateau and Guyana-Suriname margins

Júlia Gómez-Romeu ^{*1}, Emmanuel Masini ^{1,2}, Nick Kusznir ³, Philip Ball ⁴,
Sylvain Calassou ⁵

¹ M&U sas – France

² ISTerre, Institute of Earth Sciences – France

³ Department of Earth, Ocean and Ecological Sciences, University of Liverpool – United Kingdom

⁴ TOTAL New Ventures, Houston – United States

⁵ TOTAL R&D, Centre Scientifique et Technique Jean Féger (CSTJF) – France

The pre-collision template of a convergent setting often results from an earlier extensional history characterized by rift basins or passive margins (magma-poor, magma-rich or transform margins). Fossil magma-poor rifted margins have been recognized in mountain belts and their role in subduction nucleation and subsequent formation of orogens has been extensively studied. However, little is known about the tectonic control of magma-rich rifted and transform margins in convergent settings.

We use the Demerara Plateau and Guyana-Suriname margins to investigate; (i) the nature and architecture of segmented magma-rich rifted margins and (ii) how an earlier segmented magmatic rifting event may control the onset of convergent tectonics.

To achieve our aim, we interpret reflection seismic data and apply two quantitative techniques (gravity anomaly inversion and joint inversion of gravity and seismic Moho depths) to determine Moho depth, basement nature and thickness, and insights into SDRs (Seaward Dipping Reflectors) composition. This allows us to distinguish and map first order margin domains as well as interpret structural lineaments along the Demerara Plateau and Guyana- Suriname margins.

In the NW offshore Guyana, identified domains consist of 30-15 km thick continental crust (the proximal and necking domains), a magma-poor OCT and Jurassic Central Atlantic oceanic crust. In contrast, offshore in the SE Guyana and Suriname, we determine a Jurassic magma-rich OCT while in the Demerara Plateau a large SDRs domain followed more distally by Cretaceous Equatorial Atlantic oceanic crust are observed. We interpret major tectonic structures consisting of NNW-SSE oriented Jurassic rift transfer zones crosscut by a younger NW-SE transform fault of Late Jurassic to Early Cretaceous age.

Shortening in the northern Demerara Plateau is observed and interpreted as being caused by the reactivation of a Jurassic transfer zone during a change of plate kinematics related with the opening of the Equatorial Atlantic. This may record an aborted convergent plate boundary. Our study provides insights on how a segmented magma-rich rifted margin may control the initiation and dynamics of a more mature convergent system such as subduction.

Mots-Clés : Magma-rich rifted margins, transform faults, Demerara Plateau, Guyana-Suriname margins



Deep structure of the Demerara Plateau and its two-fold tectonic evolution: from a volcanic margin to a Transform Marginal Plateau, insights from the conjugate Guinea plateau

David Graindorge^{*1}, Thomas Museur^{1,2}, Frauke Klingelhoefer², Walter R. Roest²,
Christophe Basile³, Lies Loncke⁴, François Sapin⁵, Arnauld Heuret⁶, Julie
Perrot¹, Boris Marcaillou⁷, Jean-Frédéric Lebrun⁸ and Jacques Déverchère¹

¹ University of Brest - CNRS, IUEM France

² Ifremer - Centre de Brest- UR France

³ ISTerre - UMR-CNRS 5275, OSU, Univ. Joseph Fourier France

⁴ Univ. of Perpignan Via Domitia - CEFREM, UMR 5110 – Perpignan - France

⁵ Total SA - Centre Scientifique et Technique Jean Feger (CSTJF) - Pau - France

⁶ Univ. de Guyane, Université de Montpellier, CNRS – Cayenne - Guyane

⁷ University Côte d'Azur – CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur, ID, Géoazur – Valbonne – France

⁸ Géosciences Montpellier – CNRS, Université des Antilles – Pointe à Pitre - Guadeloupe

Transform marginal plateaus (TMPs) are flat intermediate depth structures which origin and relationships to adjacent oceanic lithospheres remain poorly understood. We focuss on the Demerara and Guinea conjugate TMPs at the junction of the Jurassic Central Atlantic and the Cretaceous Equatorial Atlantic Oceans by analyzing wide-angle velocity models (Demerara) and adjacent industrial seismic lines in order to explore their deep structures. The Demerara 30 km thick crust is subdivided into 3 layers, including a high velocity lower crust. The velocities do not fit values of typical continental crust but instead correspond to volcanic margin or Large Igneous Province type crusts. We propose that the continental lower crust is intruded by magmatic material and that the upper crustal layer is made of extrusive volcanic rocks of the same magmatic origin, forming seaward dipping reflector (SDR) sequences. N-S composite lines combining Demerara and Guinea reveal the spatial extent of the SDR complex but also a preexisting basement ridge separating the two plateaus. This SDR complex emplaced during hotspot (Sierra Leone) related volcanic rifting preceding the Jurassic opening of the Central North Atlantic and forming the entire Demerara-Guinea Jurassic volcanic margin. It was then reworked during a non-coaxial Cretaceous second phase of rifting splitting the Jurassic volcanic margin in two parts conceivably along the inherited basement ridge. Opening occurs in a transform mode for the northern Demerara and southern Guinea margins when Rifting of the eastern part of the Demerara plateau occurred along the eastern limit of the Jurassic SDR complex, forming its present-day eastern divergent margin. The Demerara and Guinea plateaus were then individualized on each side of the Equatorial Atlantic. This study also highlights the major contribution of thermal anomalies such as hotspots and superposed tectonic phases in the story of other TMPs.

Mots-Clés : deep structure ; volcanic passive margin ; transform margin ; marginal plateau ; Atlantic ; Guyana ; Guinea



Continental rifts and mantle convection: Insights from the East African Rift and a new model of the West European Rift System

Laurent Jolivet^{1*}, Cécile Allanic², Thorsten Becker³, Nicolas Bellahsen¹, Justine Briais², Anne Davaille⁴, Claudio Faccenna⁵, Catherine Homberg¹, Eric Lasseur², Barbara Romanowicz⁶

¹ IStEP, Sorbonne Université, Paris,

France ² BRGM, Orléans, France

³ Jackson School of Sciences, UT Austin, Texas, USA ⁴ FAST, Université Paris-Saclay, France

⁵ Dipartimento Scienze, Università degli Studi Roma

Tre, Italy ⁶ College de France, Paris, France

The origin of the Eocene-Oligocene European Cenozoic Rift System (ECRIS) is debated in terms of driving forces, far-field or near field, Alpine slab-pull or active plume. An analysis of residual (non-isostatic) topography over Africa and Europe reveals domains elongated parallel to the absolute motion of plates in a hot-spot reference frame. The East African Rift (EAR) and the ECRIS sit on top of such positive anomalies. A recent whole mantle tomographic model (French et al., 2013; French & Romanowicz, 2015; Davaille & Romanowicz, 2020) shows in addition that the low shear-wave velocity zones of the lower and upper mantle are organized with a bundle of vertical plumes and horizontal fingers pointing in the same direction parallel to the absolute motion of Africa and Eurasia, thus parallel to the main rifts. The case of the EAR and its magmatic extension toward the north across the Arabian Plate is particularly clear with several levels of such fingers. The northward migration of the first volcanism from Ethiopia to Armenia between the Eocene and the Late Miocene suggests that the asthenosphere moves faster than the plates and thus drives plate motion (Faccenna et al., 2013). We propose a simple model where plates are driven by basal drag, following an upwelling from the low-velocity anomalies below Africa and toward subduction zones. The EAR develops as lithospheric weak zones on top of the positive anomalies of residual topography due to the underlying low velocity anomalies elongated parallel to the absolute motion. This indicates an interplay between large-scale convection, a small-scale fingering instability, and lithospheric deformation. The development of the Eocene-Oligocene short-lived ECRIS and its interference with Mediterranean slab dynamics are then discussed in the framework of this simple model.

Mots-Clés : Rift ; convection ; absolute motion ; seismic tomography ; residual topograph



New sedimentological, petrographical, geochemical, and U-Pb geochronological data from breccias of the Bas Agly syncline (northeastern Pyrenees, France)

Tarik Kernif^{1*}, Thierry Nalpas¹, François Fournier², Sylvie Bourquin¹, Marc Poujol¹, Michel DeSaint Blanquat³, Milton Boucard⁴, Pierre Huruguen¹, Sarah Boularand⁵

¹ Univ Rennes, CNRS, Géosciences Rennes - UMR 6118, France.

² Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, Cerege, Um 34, France.

³ Géosciences Environnement Toulouse, Université de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS, France.

⁴ Géosciences Montpellier, Université des Antilles, Université de Montpellier, CNRS, France.

⁵ Aix Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, FSCM (FR1739), PRATIM, France.

This study focuses on breccias, widely developed in the Bas Agly syncline at the Late Jurassic/Early Cretaceous boundary. Both their age and formation processes are debated and remained hypothetical until today.

According to our detailed sedimentological study, the breccia localized in the Late Jurassic are spatially associated with large-throw normal faults and show a clear sedimentary character. They result from the creation of a steep topography that becomes unstable, producing major rockfalls. The studied breccias, are characterized by poorly sorted polygenic deposits of pebbles to boulders composed of highly angular pluri-millimetric to pluri-metric carbonate clasts. A lateral evolution is observed, with pebble-size clasts found near the normal fault and boulder-size clasts away from the fault. This evolution is related to the rockfall process as the total kinetic energy acquired by the small clasts during the fall is lower than that acquired by the bigger ones; as a result, the latter are able to travel farther. These breccias are related to a first stage of extension during the Late Jurassic and marks the beginning of the Early Cretaceous extension. However, the heterogeneity and complexity of the structure of carbonate breccias require a detailed characterization of both their petrographic evolution and diagenetic paleoenvironment in order to confirm our sedimentological model.

Based on observations under S.E.M, polarized-light and fluorescence microscopy a detailed inventory of the diagenetic phases has been performed. From these analyses, a diagenetic sequence and a chronology of the cements have been reconstructed, using principles of overlapping, superposition and inclusion. The oxygen and carbon isotopic compositions of some cements and matrices of these breccias allowed to specify the diagenetic environments.

The occurrence of metamorphic minerals overprinting the latest phase of calcite cementation strongly suggests that the breccia deposited prior to the Albo-Cenomanian regional metamorphic phase in contrast to previous stratigraphic attributions (Eocene age) and support our interpretation of an interstratified sedimentary breccia of Late Jurassic age. Thus, it is crucial to know the real age of these rocks. In order to solve this issue, we initiated a geochronological study, using in-situ U-Pb dating by LA-ICP-MS and focusing on the carbonate matrix of the breccias. This approach has proven successful and yielded ages consistent with the proposed depositional environment.

Keywords: breccias, Normal fault, extension, diagenesis, stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$), S.E.M, U-Pb dating, Bas Agly, Pyrenees.

*Intervenant (tarik.kernif@univ-rennes1.fr)



Tectono-sedimentary characterization of the Aptian carbonate platform (Urgonian) in the Chaînons Béarnais (France): role of the salt tectonics.

Raphaël Kerverdo^{*1}, Cédric Bonnel¹, Lionel Menzer¹, Charles Aubourg¹

¹Laboratoires des Fluides Complexes et leur Réservoirs (LFCR) – Université de Pau et des Pays de l'Adour(UPPA), CNRS UMR 5150, TOTAL – France

The Chaînons Béarnais (France) is a salt-detached fold belt in the western North Pyrenean Zone. These are pre-orogenic structures formed during Aptian -Albian rifting and hyper- thinning of the Iberian and Eurasian margins, which were further compressed during the Pyrenean orogeny. The role of salt diapirism in belt folding during Cretaceous extension and subsequent Pyrenean orogeny raise many questions regarding its interactions with syn- tectonic sedimentary fill.

In this work, we aim to describe the geometry of the Aptian carbonate platform deposits in the Ossau valley at the level of the Jaout and Pène Béon anticlines, in order to better constrain the controlling factors on the carbonate sedimentation. The chronology of the Aptian deposits was made possible thanks to the acquisition of new sedimentological observations and led to a reconsideration of the “Urgonian” sedimentary model in this area.

The occurrence of numerous lateral facies variations, gravity instabilities as well as syn-sedimentary geometries, allowed us to highlight an important syn-sedimentary structuration of the area. Three major depositional sequences could be identified showing different phases of aggradation and progradation of the Urgonian platform during the diapir growth. This shows that the paleogeography of the study area has evolved from an initially very regular surface to a very complex morphology.

We propose a sequential model for the evolution of the platform carbonate. Our results suggest that its morphology and geometry of the carbonate platform is controlled by salt tectonics.

Mots-Clés: North Pyrenean Zone, urgonian platform, Chaînons Béarnais, halokinetics movements, tectono-sedimentation interactions



3D structure of low-angle detachment faulting and related tectono-sedimentary processes in the SE South China Sea

Etienne Legeay^{*1,2}, Geoffroy Mohn¹, Jean-Claude Ringenbach², William Vetel²

¹ CY Cergy Paris Université, Département Géosciences et Environnement (GEC), France

² TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Féger (CSTJF), France

Before Break-Up, the opening of the South China Sea Passive Margin (SCS) was characterized by a wide rift mode during Cenozoic rifting. Such wide extensional margin (>600 km wide) is controlled by a set of hyper-extended sub-basins separated by basement highs.

These basins infill recorded a polyphased extensional deformation hence resulting in complex 3D sedimentary evolution. Based on a recent industrial 3D seismic reflection survey along the Sabah area (southern margin of the SCS), this contribution aims to investigate the detailed 3D geometries of extensional structures as well as their control on the overlying successive sedimentary sequences and relation to crustal deformation.

We mapped and analyzed several crustal-scale rolling hinge structures controlled by a series of low-angle normal faults. Deeper crustal levels are likely exhumed along the core of these rolling hinge structures, separated by extensional allochthonous blocs of upper continental crust. Our structural analysis enables us to identify three main extensional phases corresponding to distinct sedimentary packages: (1) a synrift sequence 1 controlled by small offset normal faults formed during incipient rifting; (2) an intermediate synrift sequence 2 recording the development of extensional detachment faults. (3) a thick syn-rift sequence 3 recording a continuation of extension along the detachment faults resulting in the dismembering of the syn-rift sequence 2.

Intra-basement seismic reflectors dipping towards the north-west are observed, onto which extensional structures often seem to root. These reflectors are interpreted as interleaved thrust sheets from a dismantled accretionary wedge of the former Mesozoic active margin (Yenshan Arc).

Our results provide some new key elements on the 3D mechanisms of detachment faulting and its control on sedimentary evolution as well as coeval crustal deformation. 3D approach throw some light on the detailed geometries of a metamorphic core-complex in relation with crustal boudinage, shear zones and lower/middle crust exhumation below the syn-rift sediments. These geometries can be compared to those described in the Basin and Range province or the Aegean Sea. Consequently, our results have implications for our understanding of rift and breakup mechanisms of marginal basins as a whole.

Mots-Clés : South China Sea, extensional tectonics, wide rift, Metamorphic Core Complex



Réexamen de la paléogéographie de l'anté-Cénomanién de la zone sud Sanaga (Marge Atlantique du Cameroun), à partir de l'analyse de la sismique CameroonSpan et des forages pétroliers.

Mike-Franck Mienlam Essi ^{*1}, Joseph Quentin Yene Atangana ¹, Mbida Yem ¹,
PonceNguema ², Alessandra Ribodetti ³, Tedy Landry Tonye ¹

¹ Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I -Cameroun

² Société Nationale des Hydrocarbures (SNH)-Cameroun

³ Université Côte d'Azur, IRD, CNRS, OCA, Géoazur-France

La zone Sud Sanaga appartient à la partie Sud-Est de la marge atlantique du Cameroun dans le golfe de Guinée. Ce travail analyse 20 forages pétroliers et 05 lignes sismiques CameroonSpan dans le but de réexaminer la paléogéographie de l'anté-Cénomanién dans la zone d'étude. L'analyse des puits montre que du domaine onshore jusqu'au plateau continental, l'intervalle stratigraphique étudié est limitée au sommet par la discordance du toit de l'Albien. Elle est une surface régionale qui érode les sédiments sous-jacents à proximité de la ligne côtière et dans les terres intérieures de la zone d'étude. Ces dépôts sont principalement constitués de grès, d'argilites et d'évaporites. L'occurrence d'argilites noires pendant la période anté-Cénomanién suggère que la zone d'étude était déjà transgressée par la mer à cette période, suivie d'une hausse du niveau marin avant le Crétacé supérieur. Les résultats sismiques révèlent de la profondeur vers la discordance du toit de l'Albien, l'existence de trois séquences. La première (**SE1**) présente des réflexions discontinues avec un caractère progradant-aggradant. La deuxième (**SE2**) est rétrogradante avec des réflexions parallèles et stratifiées. La troisième (**SE3**) est représentée par un caractère aggradant-progradant associé à des réflexions obliques au sommet du paquet à proximité du plateau continental. La corrélation des résultats obtenus avec l'évolution géologique de la zone d'étude, permet de déduire les correspondances géologiques des séquences identifiées. Ainsi, **SE1** est constitué de dépôts Pré-rifts (**Jurassique**) et Syn-rifts (**Néocomien**). **SE2** marque la phase de début d'incursion marine (Aptien). **SE3** correspond aux dépôts de haut niveau eustatique (Apto-Albiens) avec des faciès marins et continentaux. Cette étude révèle que l'anté-Cénomanién n'est pas essentiellement régressif mais constitue un mégacycle complet de sédimentation avec une chute importante du niveau marin à l'Albien Terminal.

Mots-Clés : Zone Sud Sanaga, Forages pétroliers, sismique CameroonSpan, Anté-Cénomanién, mégacycle.



Recent tectonics (post Messinian Salinity Crisis) in the Central Mallorca Depression, Balearic Promontory: Land–sea correlation.

Maillard Agnès ¹, Raad Fadl ², Chanier Frank ³, Lofi Johanna ², Mas Guillem ⁴
and Heida Hanneke ⁵.

¹ Géosciences Environnement Toulouse (GET), Observatoire Midi-Pyrénées, Université de Toulouse, CNRS, IRD, UMR 5563, F31400 Toulouse, France.

² Géosciences Montpellier, CNRS, Université de Montpellier, Université des Antilles - Université de Montpellier, 34095 Montpellier Cedex 05, France.

³ Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, F 59000 Lille, France.

⁴ Universitat de les Illes Balears (UIB), Carretera de Valldemossa, 07122, Palma, Mallorca, Spain.

⁵ Geosciences Barcelona (GEO3BCN-CSIC), Barcelona, 08028 Barcelona, Spain.

The Balearic Promontory underwent a complex tectonic evolution during the Neogene, as it was affected by extensional deformation linked to the back-arc opening of the northwestern Mediterranean and also by compressional Betic deformation. In addition, some significant post-orogenic extension developed within that area, mainly observed on the island of Mallorca, which exposes a large NE-SW-directed Graben that is segmented in a series of aligned sub-basins filled with syn- to post-extensional sediments, from Serravallian to Quaternary in age. Offshore between Mallorca and Ibiza Islands, a large basin named the Central Mallorca Depression recorded also some significant recent deformation. The area appears to be still tectonically active as evidenced by seafloor morphology and by several minor to moderate earthquakes registered in the past centuries.

Thanks to a widespread dataset of 2D seismic reflection profiles we could observe, between Ibiza and Mallorca Islands, a series of depocenters filled with Plio-Quaternary deposits forming mini-basins perfectly aligned with the sub-basins that constitute the Mallorca Graben. We identified complex and non-cylindrical deformation within the Plio-Quaternary unit and an intra-PQ unconformity that we interpret as the marker of a transition from extensional to strike-slip tectonic regime during the Pliocene. The strike-slip motion along faulted corridors is responsible for a succession of transpressional and transtensional structures respectively, interpreted as restraining/releasing bends and step overs along the faults. We show that the faults identified offshore from seismic data overlap well the epicenters of registered seismic events and underline some major active N70° trending strike-slip corridors running onshore/offshore from the eastern Mallorca shelf to the southwestern Ibiza margin through the Central Mallorca Depression. We propose an integrated offshore/onland sketch of the Neogene tectonic evolution of the area and try to interpret it with regard to the western Mediterranean geodynamics, the corridors running parallel to the Balearic Promontory margins such as the Emile Baudot Escarpement which interpretation remains unclear.

Keywords : Balearic Promontory, Central Mallorca Depression, Strike-slip deformation, Evaporites.

This research is carried out under the SALTGIANT ETN, a European project funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement number 765256



Deep structure of the Pará-Maranhão/Barreirinhas passive margin in the Equatorial Atlantic (NE Brazil)

Maryline Moulin^{1,*}, Daniel Aslanian¹, Flora Gallais¹, Alexandra Afilhado^{2,3},
Philippe Schnurle¹, Mikael Evain¹, Nuno Dias^{2,3}, Jose Soares⁴, Reinhart Fuck⁴,
Otaviano da Cruz Pessoa Neto⁵, Adriano Viana⁵ and the MAGIC Team⁶

1) Ifremer France

2) ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal

3) IDL, Instituto Dom Luis Lisboa, Faculdade das ciencias da Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa, Portugal.

4) Instituto de Geociencias, Universidade de Brasilia, Campus Darcy Ribeiro, 70910-900 Brasilia, Brazil

5) Petrobras, Cenpes Research Center, Rio de Janeiro, Brazil

6) Morvan, L., Mazé, J.P., Pierre, D., Roudaut-Pite, M., Rio, Alves, D., Barros Junior, P., Biari, Y., Corela, C., Crozon², Duarte, J.L., Ducatel, C., Falcão, C., Fernagu, P., Vinicius Aparecido Gomes de Lima, M., Le Piver, D., Mokkedem, Z., Pelleau, P., Rigoti, C., Roest, W. & Roudaut, M.

The Pará-Barreirinhas margin, North Brazil, is a pull-apart passive margin, with two strike-slip borders, formed during the opening of the Equatorial Atlantic Ocean during Cretaceous time. Its geometry and evolution are speculative due to the lack of information on the crustal structure and the crustal nature. We present here the profiles of the MAGIC (**M**argins of **br**Azil, **G**hana and **I**vory **C**oast) deep seismic experiment, a joint project between French and Brazilian universities, research institutes and the industry. We perform forward modelling through combined interpretation of the multichannel seismic and of the main reflected and refracted of these phases recorded by the OBSs. The final P-wave velocity models reveal distinct structural domains from onshore Brazil towards the Atlantic Ocean characterized by variations of the crustal thicknesses and velocities: (1) an unthinned continental crust below the São Luís Craton, where the crust is 33 km thick, (2) a 60 km wide necking domain below the Ilha de Santana Platform; (3) offshore, east of the continental slope, a 10km-thick deep sedimentary basin underlain by a 5km thick crust with velocity of 6.2-6.9 km/s that we interpret as an exhumed lower continental crust, on the top of an Anomalous Velocity Layer (AVL) probably made of intrusions of mantle-derived melts into the lower continental crust, or a mixture of them; (4) eastwards, the limit of the previous domain is marked by NW-SE aligned volcanoes and the disappearance of the AVL. The sedimentary succession becomes thinner (6 km) overlaying a proto-oceanic crust characterized by seismic velocities higher than “normal” oceanic crust in its upper part, but in continuity with the velocity described in the previous domain; (5) followed by a more characteristic but thin oceanic crust.

The middle/lower continental crust seems not only to have a crucial role in the genesis of the passive margin but also to be involved in the genesis of the first oceanic crust.

Mots-Clés : Equatorial Atlantic Ocean, Pará-Maranhão/Barreirinhas margin, Northeast Brazil, passive margin, crustal structure, lower continental crust, proto-oceanic, wide-angle seismic



Structure et évolution tectonique des marges mésozoïques de l'Est de la Méditerranée

Michael Nirrengarten ^{*1}, Geoffroy Mohn ¹, François Sapin ², Charlotte Nielsen ²,
JulieTugend ¹

¹ Laboratoire GEC, CY Cergy Paris Université, Neuville sur Oise,
France ² Total SA, CSTJF, Pau, France

Le domaine de l'Est de la Méditerranée est actuellement dominé par un régime tectonique en convergence associé à la subduction égéenne. Cependant ce domaine préserve également les reliques de domaines océaniques et de marges passives formées par des processus extensifs au cours du Mésozoïque. L'âge et l'orientation de l'ouverture de ces marges et bassins océaniques sont des questions récurrentes à l'origine de la grande variété des modèles géodynamiques actuels.

Notre étude vise à déterminer la structure des différents segments des marges Nord- Africaine et Levantine qui borde le sud et l'est de la Méditerranée de l'Est sur la base d'observations issues d'un dense réseau de lignes sismique réflexion. L'analyse structurale et les variations observées entre les différents sous-bassins ont ainsi pour objectif de mieux contraindre les processus d'extension et de rupture continentale. L'intégration de ces nouvelles observations dans un modèle cinématique global permettra ainsi de comprendre l'influence relative de l'ouverture de l'Atlantique Central et de la subduction de l'Océan Téthys sur l'évolution géodynamique de ce système.

L'imagerie sismique des structures profondes de la zone d'étude est particulièrement difficile en raison d'une épaisse couche d'évaporites messiniennes, de séries clastiques Cénozoïque et de plateformes carbonatées Mésozoïques localisées sur les hauts de socles. Des découvertes gazières récentes ont entraîné l'acquisition de nouvelles données sismiques de meilleure qualité, notamment des cubes sismiques 3D qui mettent en évidence des structures extensives anciennes mésozoïques. Notre approche intègre des données sismiques à différentes échelles le long de la marge Nord-Africaine et du Levant ainsi que des données de puits et des informations stratigraphiques provenant de l'ancienne marge conjuguée au Nord actuellement intégrée dans les orogènes des Balkans et d'Anatolie.

Dans cette présentation, nous proposons de nouvelles coupes géologiques régionales à travers ces marges, une série de cartes structurales incluant les domaines de rift de l'Est de la Méditerranée et des régions voisines ainsi qu'un calendrier d'ouverture des différents bassins. Les résultats préliminaires mettent en évidence plusieurs phases d'extension enregistrées dans différents segments de marge avant un amincissement crustal majeur amenant à l'océanisation de l'Est de la Méditerranée à partir de la fin du Jurassique Inférieur. Une des caractéristiques majeures et communes aux marges de ce système est la transition très étroite et apparemment peu structurée entre des domaines de marges continentales proximales recouvertes de plateformes carbonatées et un bassin profond. Ce type d'architecture peut être caractéristique de marge transformantes ou très obliques, cependant elle est observée dans toutes les orientations du système Est Méditerranéen. Ainsi nous suggérons que cette structure de marge est typique du domaine Téthysien et est formée par un mode de rupture continentale commun dont les paramètres physiques et géodynamiques restent à discriminer.

Mots-Clés : Marges riftées, Est de la Méditerranée, Rifting,



Les évaporites Crétacé de la marge du Congo : architecture stratigraphique et modèle de dépôt

Alexandre Pichat^{*1}, Laurent Gindre-Chanu², Vincent Delhay-Prat³, Michel Guiraud⁴,
Eric Gaucher³, Sidonie Revillon⁵, Andrew Pedley⁶

¹ E2S-UPPA, Total, CNRS, Univ. Pau & Pays Adour, LFCR-IPRA, UMR5150, Pau -

France ² TERRA GEOSCIENCES

³ TOTAL, C.S.T.J.F. – France

⁴ Université de Bourgogne Franche-Comté, Centre des Sciences de la Terre, UMR
CNRS 62825 SEDISOR, Plouzané, France

⁶ Minsearch Geological Consulting

L'ouverture de l'Atlantique Sud enregistre à l'Aptien le dépôt d'immenses quantités d'évaporites localement accumulées sur 1 à 2 km d'épaisseur. Sur la partie proximale de la marge congolaise, les évaporites ont été peu affectées par des déformations salifères, et leur architecture primaire a donc été préservée. Par l'intermédiaires de nombreux puits pétroliers et miniers réalisés dans cette zone, et via l'accès à des carottes forant toute la série salifère, il a été entrepris une étude multidisciplinaire pour mieux comprendre le bassin salifère ouest africain.

L'étude sédimentologique des carottes montre 11 grands cycles évaporitiques pouvant faire jusqu'à 160 mètres d'épaisseur, limités par des niveaux argileux et majoritairement constitués d'halite, carnallite et d'accumulations de bischofite/tachyhydrite. La caractérisation des faciès et l'identification de surfaces stratigraphiques clefs permettent de proposer un environnement de dépôt de type rampe pouvant évoluer de relativement profonds à subaérien en fonction des cycles évaporitiques.

Les corrélations stratigraphiques à l'échelle du bassin congolais montrent que les niveaux argileux et les bancs carnallitiques d'échelle pluri-centimétrique peuvent se corréler latéralement sur plusieurs centaines de kilomètres, suggérant ainsi la présence d'un immense plan d'eau sur toute la marge congolaise. En revanche, les sels les plus solubles de bischofite et tachyhydrite se sont accumulés dans des dépôt-centres dont la localisation migre du sud vers le nord. Cette migration est interprétée comme enregistrant la propagation vers le nord de l'exhumation du manteau et / ou, de la production de croûte océanique ayant lieux en partie hyper distale de la marge, et accommodée en partie proximale par le jeu de grandes failles de transfert d'échelle crustales à lithosphériques

Mots-Clés : Evaporite, Congo, marge africaine, Aptien



Origine des évaporites aptiennes de l'Atlantique Sud : contraintes géochimiques dans la partie proximale de la marge du Congo

Alexandre Pichat^{*1}, Eric C. Gaucher², Sidonie Revillon³, Pierre Agrinier⁴

1 E2S-UPPA, Total, CNRS, Univ. Pau & Pays Adour, LFCR-IPRA, UMR5150, Pau -

France2 TOTAL, C.S.T.J.F. - France

3 SEDISOR, Plouzané,

France4 IPGP,

Paris, France

L'ouverture de l'océan Atlantique Sud enregistre à l'Aptien la mise en place d'un immense bassin salifère. Dans la région du Congo, l'assemblage minéralogique des évaporites accumulées est particulier et mal compris. La section salifère présente 11 séquences évaporitiques principalement composées d'halite, de carnallite et d'épaisses accumulations de bischofite / tachyhydrite. Les sulfates sont quasi absents en dehors de la partie supérieure de la série. Afin de contraindre l'origine des sels, des analyses élémentaires et isotopiques ont été effectuées sur des échantillons de carottes forées dans le domaine proximal du bassin congolais.

Le $\delta^{37}\text{Cl}$ des halites et des carnallites présente les valeurs attendues pour une eau marine ayant été partiellement pré-concentrée. Les valeurs isotopiques du Sr témoignent en revanche d'une forte composante crustale, fluviale à hydrothermale. Les teneurs en éléments traces (Rb, Fe, Zn, REE...) couplées aux isotopes du Nd et du Pb permettent de différencier les apports fluviaux des apports hydrothermaux crustaux. De plus, les données élémentaires et isotopiques suggèrent (i) des processus de recyclage lors de la précipitation des sels ultimes et (ii) des interactions hydrothermales spécifiques impliquant potentiellement des fluides en condition supercritique.

Sur la base des précédentes études tectono-stratigraphiques, nous proposons un modèle de dépôt dans lequel (i) les apports marins venaient du nord (depuis l'Atlantique Centrale), (ii) les sources fluviales étaient très locales et drainaient la chaîne du Mayombe et (iii) les sources hydrothermales étaient issues de circulations thermohalines profondes localisées au niveau de grandes failles de transfert crustales.

Enfin, dans la partie supérieure de la section salifère, la présence croissante de sulfate et les valeurs isotopiques en S, O et Sr suggèrent un déconfinement progressif du bassin salifère au domaine océanique avant l'établissement d'un environnement marin ouvert. Ces résultats traduisent l'origine complexe et multiple (marin, crustal, hydrothermal) des saumures à partir desquelles les sels ont précipité.

Mots-Clés : Evaporite, Congo, géochimie, marge africaine, Aptien



Limpopo magma-rich transform margin (South Mozambique), implications for the Gondwana breakup

Vincent Roche^{*1}, Sylvie Leroy¹, François Guillocheau², Sidonie Revillon³, Louise Watremez⁴, Elia d'Acremont¹, William Vetel⁵, Frank Despinois

5

¹ Sorbonne Université, CNRS, Institut des Sciences de la Terre de Paris, ISTeP, Paris – France

² Univ Rennes, CNRS, Géosciences Rennes, UMR 6118, 35000 Rennes – France

³ SEDISOR/LGO, UMR 6538, IUEM, Plouzané – France

⁴ Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, Lille – France

⁵ TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – France

The continental rifted margins of Mozambique provide an excellent example of continental passive margins with a significant structural variability associated to magmatism and inheritance. Despite accumulated knowledge in this area, the tectonic structure and nature of the crust from Mozambique margins, especially the Limpopo transform margin are still poorly known. Here, we use high-resolution seismic reflection dataset and wells from industry to propose a structural interpretation of this area.

Our results indicate that the Limpopo transform fault zone limits a continental crust westward, with deep Karoo grabens, from an oceanic crust domain eastward. The Limpopo transform margin also shows a widespread magmatism, attested by the presence of lava flows and highly magmatic oceanic crust, implying different thermal perturbations through time and space.

We suggest that the expression of thermal perturbations started with the Karoo Large Igneous province emplacement at about 180 Ma. This intense magmatism event is favored by pre-existing and neo-formed faults, which may contribute significantly to the distribution of magma generated. We propose an evolution model from the onset of the rifted margin to the seafloor spreading along the Limpopo magma-rich transform margin with (i) an E-W extension trend responsible for the formation of a large fault-controlled basin during the Permo-Trias (T_1); (ii) the extension becoming NNW-SSE, oblique to the margin direction as attested by the presence of flower structures, allows for reactivation of previous structures inducing the deposition of a volcano-sedimentary wedge, and the formation of several magmatic infilling during the Jurassic (T_2); (iii) the onset of oceanic spreading after ca. M25 (*i.e.* 156 Ma) in the Limpopo area which triggered the uplift and erosion of the proximal parts of the margin as well as the formation of several other magmatic infilling (T_3).

Key words: Transform Margin, Mozambique, seismic reflection, magmatism



Geodynamic Reconstruction, Tectono-Stratigraphical and Geophysical approach for the Interpretation of northeastern Tunisia Gulf of Tunis offshore

Sabrine Helali ^{*1}2, Kais Aridhi ¹, Sabri Aridhi ³, Fetheddine Melki ¹, Attilio Sulli ², Mauro Agate ²

¹ Departement of Earth Sciences, sciences university of Tunis El Manar, Tunisia

² Università degli studi di Palermo , Italy

³ Entreprise Tunisienne d'activité pétrolière

To unravel the tectonic evolution, reconstruct the geometry of the flexural basin of the north- eastern sector of Tunisia, a tectonic-lithostratigraphic analysis of a grid of seismic reflection profiles has been carried out. This allowed identifying the lithostratigraphic succession in the area that ranges from Triassic to recent and mainly represented by deep to shallow marine deposits organized in two major sedimentary cycles, several reverse faults, and associated folds, the presence of normal listric faults and showed the role of thrusting. The study was concerned with tectonic events taking place during both Pyrenean and alpine deformation.

The alpine with a NW-SE direction and dated Late Miocene is responsible for the displacement of the Numidian flysch from North to South. The thick Late Miocene fluvial deposits are the first common sedimentary cover overlying unconformably the autochthonous, parautochthonous, and allochthonous sequences. It has an erosional contact with these different underlying sedimentary units. The Pyrenean with a WNW-ESE direction dated Late Cretaceous to Late Eocene, well defined by the Oligocene angular unconformity. The villafranchienne, the last phase of compression, has just increased the deformation already made during the alpine phase and we have a relaxation structural time between these two phases marked by the Messinian crisis. The geodynamic reconstruction was based on an interpreted post-deformation geological model and constrained by balancing the seismic section and shortening calculation of the seismic line trending NW-SE. Taking into consideration the succession of syn-Mesozoic and tertiary tectonic events: the two phases are well distinguished and defined on our seismic profiles limiting down and up the succession of various dips. The determination of shortening was a complex exercise due to a lack of parameters. However, we determined a value of about 9% in the foreland basin, for the folds between the Pyrenean and Alpine unconformity. This rate matches perfectly with the defined values obtained by several authors. The proposed geological model fits well the interpreted seismic section and the identified structure suggests the possibility of the presence of structural traps generated by sinistral strike-slip deformation after the alpine event.

Keywords: Seismic lithostratigraphy, Tectonic evolution , thrusting ,alpine and Pyrenean deformation shortening, northeastern Tunisia .



Orographic precipitations control the structural and magmatic evolution of continental rifts: the East African Rift System

Pietro Sternai^{*1}, Giacomo Corti², Eduardo Garzanti¹, Velela Astarte Paiva Muller¹

¹ Department of Earth and Environmental Sciences, University of Milano-Bicocca – Italy

² National Research Council, CNR, Geosciences and Georesources Institute, UOS Firenze - Italy

Geodynamic processes leading to continental rifting shape the surface of our planet, opening up new oceanic seaways and controlling the location and evolution of igneous provinces and sedimentary basins. The rupturing of the continental lithosphere is primarily caused by magma-assisted intra-plate and mantle-flow endogenous forces, but surface processes contribute substantially to the structural and magmatic evolution of rifts. In this context, the effect of lateral erosion gradients on the evolution of continental rifts is generally overlooked, notwithstanding the orographic forcing imposed on precipitation and erosion patterns by the high domal topography generated at rift systems. We address this aspect of continental rifting by means of fully coupled thermomechanical geodynamic numerical modeling, accounting for a rheologically stratified lithosphere, rock partial melting, and surface processes proportional to stream power. Results show that the magma migration and strain localisation patterns due to intra-plate and mantle flow related extension are deflected by up to hundreds of kilometres toward the region of enhanced erosion, depending on the integrated strength of the continental lithosphere. Rheological heterogeneities within the continental lithosphere, which exert a primary control on the localisation of extensional strain, may greatly enhance this climatic control on rifting. The Northern East African Rift, where off axis magmatism occurs on the wetter and more eroded Ethiopian margin, and the Central East African Rift, where a western magma-poor branch and an eastern magma-rich branch developed along pre-existing structures wrapping around the rheologically strong Tanzania craton, provide natural examples of these findings.

Mots-Clés : Continental rifting, Orographic precipitation, East Africa Rift System, Numerical modeling



Pre-, syn- and post-breakup evolution of northern South America from apatite fission track data and inverse thermal history modelling

Sébastien Ternois ^{*1,2}, Jocelyn Barbarand ², Jean-Yves Roig ³, Renaud Couëffé ³, Flora Bajolet ³

¹ ISTO - UMR 7327 CNRS-Université d'Orléans-BRGM - Orléans, France

² GEOPS - UMR 8148 CNRS-Université Paris-Saclay - Orsay, France

³ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - Orléans, France

Phanerozoic evolution of the Guiana Shield in northern South America is poorly known and remains an important question for source-to-sink studies. As part of the *Source to Sink* project TOTAL R&D-BRGM-INSU, this study presents a suite of 40 new apatite fission track analysis results from French Guiana, Surinam and north Brazil. Inverse thermal history modelling reveals a marked, albeit poorly constrained, period of relatively high temperatures (temperatures > 110 °C) during the Jurassic (200-150 Ma), i.e. prior to the generally accepted timing of the Equatorial Atlantic Ocean opening (150-110 Ma). Lower temperatures are recorded on the southern flank of the Amazonas Basin and a little portion of the Surinam interior. All data reveal then a protracted phase of cooling starting from ~150 Ma and representing the main event during the Mesozoic and Cenozoic for French Guiana and Surinam basement. A second thermal event is nevertheless recorded after the deposition of Upper Jurassic and Lower Cretaceous detrital sedimentary rocks on the northern flank of the Amazonas Basin. Maximum temperatures for this event (80-100 °C) are reached during the middle Cretaceous (115-90 Ma). Implications of these new results for the Guiana Shield evolution and the Equatorial Atlantic opening are discussed.

Mots-Clés : Guiana Shield, Equatorial Atlantic margin, apatite fission track



Déformation et sismicité du nord de l'Algérie

Aicha Derkaoui ^{*1}, Messaoud Hacini ¹

¹ UKBO – Université kasdi Merbah Ouargla - Algérie

Dans la région Méditerranéenne s'affrontent les plaques Africaine et Eurasiatique. La frontière de plaque associée à cette convergence correspond à une zone de déformation. Cette déformation de la région est associée à une sismicité qui touche un certain nombre de pays.

Dans le nord de l'Algérie, l'activité sismique qui résulte de cette convergence se concentre principalement dans la chaîne Tellienne où des événements modérés à forts se sont produits. La région la plus active reste la partie côtière. La sismicité au nord de l'Algérie trouve donc son origine dans le contexte géodynamique de la région ouest Méditerranéenne.

L'importance de la sismicité de la zone nord d'Algérie, attestée par des documents historique rend impératif de mieux connaître l'aléa sismique afin d'étudier la cinématique ainsi que la déformation tectonique dans cette zone pour les études de déformation géodynamique et sismique.

Les différentes failles actives existantes, leurs types ainsi que les aspects tectoniques et sismiques de cette région seront discuté dans cet article.

Mots-Clés : aléa sismique, plaques tectoniques, déformation.



Gondwana breakup: messages from the North Natal Valley

Maryline Moulin¹, Daniel Aslanian^{1*}, M. Evain¹, A. Leprêtre^{1,2}, P. Schnurle¹, F. Verrier¹,
J. Thompson¹, P. De Clarens³, N. Dias^{4,5} and the PAMELA-MOZ35

Team^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13}

¹IFREMER, REM/GM/LGS, Centre de Brest, 29280 Plouzané, France

²LGO, Laboratoire Geosciences Ocean, IUEM, CNRS, 29280 Plouzané, France

³Total, R&D, avenue Larribau, 64000 Pau, France

⁴ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal

⁵IDL – Instituto Dom Luis, Lisboa, Faculdade das Ciências da Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa, Portugal

⁶UPMC, Univ Paris 6, CNRS UMR 7193, ISTEP, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France

⁷AWI, Am Alten Hafen 26, D-27568 Bremerhaven, Germany

⁸BGR, Geozentrum Hannover, Stilleweg 2, 30655 Hannover, Germany

⁹INAMI, Praça 25 de Junho, n°380, P.O. Box. 217, Maputo, Mozambique

¹⁰IFPEN, 1 & 4, avenue de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison Cedex, France

¹¹INP – Instituto Nacional de Petróleo, Rua dos Desportistas, Parcela n° 259 E, Maputo, Mozambique

¹²Nelson Mandela Metropolitan University, Port Elisabeth, South Africa

¹³IMAF, Instituto Nacional do Mar e Fronteiras, Av. Ahmed Sekou Touré nr, 21, 6o Andar, Flat 61, C.P. 4189, Maputo, Mozambique

The Natal Valley, offshore Mozambique, is a key area for understanding the evolution of East Gondwana. Within the scope of the integrated multidisciplinary PAMELA project, we present new wide-angle seismic data and interpretations, which considerably alter Geoscience paradigms. These data reveal the presence of a 30 km-thick crust that we argue to be of continental nature. This falsifies all the most recent paleo-reconstructions of the Gondwana. This 30 km-thick continental crust 1000 m below sea level implies a complex history with probable intrusions of mantle-derived melts in the lower crust, connected to several occurrences of magmatism, which seems to evidence the crucial role of the lower continental crust in passive margin genesis.

Mots-Clés : Gondwana Breakup, Passive Margin, Natal Valley, Indian Ocean



T1.12 Understanding subduction interface dynamics : where do we stand ?



Slabitzation: mechanisms controlling subduction development and viscous coupling

P. Agard^{1,*}, C. Prigent^{1,2}, M. Soret¹, B. Dubacq¹, S. Guillot², D. Deldicque³

¹Sorbonne Université, CNRS-INSU, Institut des Sciences de la Terre Paris (ISTeP), France

²Institut des Sciences de la Terre (ISTerre), Université Grenoble-Alpes, France

³Laboratoire de Géologie, Ecole Normale Supérieure, Paris, France

This study investigates mechanisms controlling subduction development and stabilization over time (coined as 'slabitzation'), from a nascent slab to a mature slab viscously coupled to mantle convection, from grain scale to plate tectonics scale. Beneath ophiolites, frozen-in portions of the subduction plate interface with both sides still preserved allow characterizing the evolution, shortly after subduction initiation, of mechanical coupling, slab penetration and mantle wedge metasomatism. Combining structural field work, mineralogical and crystallographic data, thermodynamic modelling and geochemistry from/on both sides of the plate interface, i.e. the base of the mantle wedge (basal peridotites) and crustal fragments from the slab (metamorphic soles), we track the evolution of the interface with progressive localization of strain and fluid transfer, from 1.2-0.9 GPa 900-750°C to 0.7-0.5 GPa 750- 600°C. The neo-formed minerals, enrichment in FMEs and isotopic signatures show that the mantle base was infiltrated by slab-derived fluids migrating at ~1-10 m/a. Coeval deformation and reactions in slab metabasalts reveal the importance of mineral changes and deformation modes in controlling fluid delivery, detachment and accretion of successive slab slices to the mantle. This study documents how the interplay between metamorphic reactions, fluid/melt transfer and deformation mechanisms, particularly dissolution- precipitation creep (DPC), progressively stabilize the plate interface: (i) suppression of fluid transfer and DPC at depth triggers the onset of viscous coupling. This first occurs near ~ 30 km depth during subduction infancy and leads to sole formation; (ii) with increased cooling and fluid availability, strain localization develops downwards and unzips the subduction interface. The downward migration of viscous coupling triggers localized mantle wedge upwelling, leading to short-lived suprasubduction ophiolite or forearc lithosphere formation;

(iii) the locus of viscous coupling stabilizes near ~80-100 km in mature (and cold) subduction zones, and sets mantle counterflow after ~10 Ma. This is where and when plates get reattached and slabs become part of the mantle convection system.

Mots-Clés : subduction initiation; rheology; viscous coupling; ophiolite; metamorphic sole



Oceanic subduction in the Alps

P. Agard^{1,*}, M.R. Handy²

¹ Sorbonne Université, CNRS-INSU, Institut des Sciences de la Terre Paris (ISTeP), France

² Institute of Geological Sciences, Freie Universität Berlin, Berlin, Germany

The Alps are amongst the best subduction archives in the world, with abundant blueschists and eclogites in a well-preserved tectono-metamorphic architecture. We show that this record is neither exceptional nor atypical but rather exemplifies the fate of relatively short-lived and small, slow-spreading and slowly closing North Atlantic-type oceans (in this case a ~600 km-wide domain closed over 60 Ma, at ~1 cm/a), characterized by short subducting slabs confined to small-scale convection. Such domains comprise variably refertilized exhumed mantle, irregularly distributed magmatic rocks and pelagic sediments, together with broad OCTs, that feature extensional allochthons and thinned continental fragments.

Contrasts in rock recovery with time and space outline distinct subduction dynamics along the belt. During the first half of subduction lifetime (~30 Ma), no subducted oceanic fragment was recovered. Afterwards, all fragments show P-T conditions matching those of mature subduction worldwide. A marked difference is observed between metasediment- and mafic/ultramafic-dominated units (S and MUM units). While underplating of S units took place discontinuously through time and preferentially at ~30-40 km depth, MUM units deeply subducted to ~80 km (corresponding to mantle fragments and early magmas emplaced immediately outboard of the margin) are only recovered in the W. Alps and late, i.e. within a few Ma at most prior to continental subduction. At the scale of the orogen, the greatest recovery of subducted MUM units coincides with the presence of continental material (Briançonnais, Sesia), demonstrating a strong influence of initial margin architecture and/or continental subduction. These features contrast with those of large oceans and suggest that the subduction archive, whilst typical of subduction thermal regimes, selectively preserves slow-spreading oceans and/or hyperextended margins.

Mots-Clés : subduction dynamics; blueschists; eclogites; slow-spreading ocean; exhumation



Migration de la fosse et déformation de la plaque supérieure en zone de subduction: le rôle des mouvements mantelliques asthénosphériques

Manar Alsaif, Fanny Garel ^{1*}, Frédéric Gueydan ¹, D. Rhodri Davies ²

¹ Géosciences Montpellier, Université de Montpellier & CNRS, Montpellier,
France2 Research School of Earth Sciences, ANU, Canberra, Australia

Historiquement, le retrait de la fosse a été associé à une extension de la plaque supérieure au-dessus du panneau plongeant. Cependant, les zones de subduction sur Terre montrent plusieurs exemples de fosses en recul associées à des contraintes compressives. Nous étudions la déformation (arrière-arc) de la plaque supérieure pour une subduction en retrait via des modèles numériques thermo-mécaniques en 2-D simulant une subduction stationnaire qui accélère brutalement, modifiant ainsi les courants asthénosphériques, le retrait de la fosse et la déformation de la plaque chevauchante. La compétition entre les courants dans le manteau asthénosphérique sous les plaques (vers 100-200 km de profondeur) affectent le retrait de la fosse et le rollback du slab: ainsi une traction du slab élevée peut néanmoins être associée à une fosse peu mobile. La déformation de la plaque supérieure dépend également des conditions mécaniques aux limites : si la plaque est libre de bouger, sa déformation sera plutôt compressive ; mais une plaque fixe sera en extension. Enfin, pour des cas particuliers, on observe que la déformation extensive de la plaque supérieure peut promouvoir un retrait de la fosse. Ces résultats expliquent en partie les styles opposés de déformation observés dans des subductions où la fosse est en retrait, en particulier les Andes où la plaque chevauchante est en compression, et la mer Egée où elle est en extension.

Mots-Clés : subduction, slab rollback, retrait de la fosse, déformation de la plaque chevauchante, courants asthénosphériques



How does a subduction initiate at an oceanic transform fault? Counter-intuitive insights from numerical experiments

Diane Arcay¹, Serge Lallemand¹, Sarah Abecassis¹, Fanny Garel¹

* ¹Geosciences Montpellier, Univ. Montpellier, CNRS, Univ. des Antilles, Montpellier, France

The process of subduction initiation, especially at an oceanic transform fault or fracture zone, is still poorly constrained and caused a great deal of controversy such as: Can subduction initiate there without any external forcing? Is the thicker plate really the more likely to subduct? To try to answer the first question, we present a parametric study of the feasibility of “spontaneous” subduction initiation, i.e., lithospheric gravitational collapse, at a transform fault (TF). Candidates from recent subduction initiation events at an oceanic TF that could fulfill the criteria of spontaneous subduction are identified, including Izu–Bonin–Mariana, Yap, and Matthew and Hunter. An extensive exploration of conditions allowing for the spontaneous sinking of the older oceanic plate at a TF using 2-D thermo-mechanical simulations is then performed. The parametric study better delimits the ranges of mechanical properties necessary to achieve the old plate sinking (OPS). We characterize the OPS conditions in terms of the reasonable vs. unrealistic values of the mechanical parameters. The parameters that exert the strongest control over whether OPS can occur or not are the brittle properties of the shallow part of the lithosphere, which affect the plate resistance to bending, the distance away from the TF over which weakening is expected, and the crust density. One mechanical parameter at least has to be assigned an unrealistic value and at least two other ones must be tuned to extreme ranges to achieve OPS, which we do not consider realistic. We point out inconsistencies between the process and consequences of lithospheric instability as modeled in our experiments, and records of subduction infancy, for the 3 geological candidates of « spontaneous » subduction initiation, to conclude that this process of « subduction initiation at a TF is unlikely in modern Earth conditions. Next, we simulate normal convergence imposed symmetrically on the two oceanic plates and study the mode of subduction initiation. We find that the success of initiation, as well as the subduction polarity (defined by the incoming plate) strongly depend on the plate age offset and the initial geometry of the transform fault. The results of the numerical experiments are finally compared to a new and exhaustive compilation of Cenozoic subduction initiations.

Mots-Clés : subduction initiation, numerical simulations, gravitational lithospheric collapse, transform faults.

*Intervenant



A comparison of the post-seismic deformation of Maule and Illapel earthquakes: Highlights on the presence of a low viscosity channel over the deep subduction interface

Hugo Boulze * ¹, Christophe Vigny ¹, Emilie Klein ¹, Luce Fleitout ¹

¹ Laboratoire de Géologie de l'École Normale Supérieure, UMR 8538 du CNRS, Paris

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) allow to measure the motions of the earth's crust. After the Maule, Tohoku and Aceh megathrust earthquakes, uplift has been observed in vertical GNSS time series over the seaward side of the volcanic arc. Concerning the Maule earthquake (Mw 8.8) in 2010 in south-central Chile, the vertical uplift reached 3 cm/year during the first years after the earthquake and induced more than 15 cm of cumulative displacement in 10 years.

Numerical experiments based on 3D spherical finite element models (FEM) are used to model the subduction process. They allow, in particular, to explore geometries and rheologies that reproduce best the surface deformations observed by GPS. Models built for the Maule earthquake have highlighted that a low viscosity channel (LVC) at depths larger than 50 km is requested to match the vertical motion observed in GNSS data. A LVC is a thin layer between the subducting plate (slab) and the overriding plate with a viscosity of a few 10^{17} Pa.s, lower than in the asthenosphere. This LVC area can be related to the dehydration of the slab which generates serpentinization of the olivine present in the asthenosphere.

In September 2015, the Illapel earthquake (Mw 8.3) occurred in north-central Chile. Contrary to the Maule area, the slab is here flattened under the Andes Mountains. Simple observations on GNSS time series in the Illapel area show that no post-seismic uplift occurred after the Illapel earthquake. The hypothesis is that the presence of the flat slab in this region inhibits the action of the LVC. In order to explore this hypothesis, we follow the same methodology as previous studies made in Maule, to model the post-seismic deformation. We present here 3D FEM models exploring the effect on surface deformation of the slab geometry and of the presence or absence of the LVC.

Key words: GNSS ; Finite Element Model ; Subduction ; Chile ; Post-seismic

*Intervenant



Extension as a major tectonic process of the evolution of Southern Ecuador compressional forearc

Cédric Bulois ^{*1}, Marianne Saillard ¹, François Michaud ^{1,2}, Nicolas Espurt ³, Andréa Peuzin ¹, Maria-José Hernandez ^{1,2,4}, Pedro Reyes ⁴, Diego Barba ⁵

¹ Université Côte d'Azur, IRD, CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur, Géoazur, France.

² Sorbonne Université, Faculté des Sciences et Ingénierie, France

³ Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, Coll France, CEREGE, France

⁴ Departamento de Geología, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

⁵ Petroamazonas EP, Ecuador

Extensional faults are often observed along subduction zones as a response of a margin collapse. However, their role remain underestimated within the structural evolution of forearc systems. In southern Ecuador, the oblique subduction of the Nazca Plate beneath South America led to the formation of the Cretaceous-Miocene NW-SE Chongón-Colonche Cordillera surrounded by Eocene-to-recent sedimentary basins. This region, generally interpreted as an onshore-offshore compressional forearc, interferes with the active tectonic escape of the North Andean Sliver and the opening of the Gulf of Guayaquil.

Herein, we explore fault distribution and kinematics along the onshore-offshore Santa Elena Peninsula using academic and industrial 2D seismic profiles calibrated with wells and field data. Polyphase trench-parallel and NW-SE-trending, >20km-long normal faults are observed cross-cutting the former Chongón-Colonche thrust wedge. Faults are either steep and oceanward-dipping along the trench, or low-angle continentward-dipping through the platform where they likely reactivate former thrusts. We specifically observe repeated extensional pulses during Eocene, Miocene and Plio-Pleistocene times, separated by inversion periods, and shaping the geometry of various forearc basins. In the Late Pleistocene, normal faults are also associated with uplifted marine terraces.

We interpret normal faulting as an overlap of long-term and short-term processes, such as the subduction of bathymetric asperities, underplating and/or variations of convergence velocity, and more recently the North Andean Sliver escape. NW-SE extensional structures dissect the overall thrust wedge through the Cenozoic and are combined with N-S to NW-SE active faults over the Quaternary. This polyphase setting shows eastward-stacked accretionary wedges with thrusts reactivated as normal faults, suggesting that pervasive inheritance processes take place continuously. This project is part of the ANR MARACAS (ANR-18-CE31-0022, MARine terraces along the northern Andean Coast as a proxy for seismic hazard ASsessment).

Mots-Clés : stacked accretionary wedge, normal faulting, fault reactivation, forearc basin dynamics, Ecuador margin, Andean-type tectonics



From Mg/Ca-carbonates to organic compounds at high pressure: the carbon journey at the Monviso meta-ophiolite

Clara Caurant ^{*1}, Baptiste Debret ¹, Bénédicte Ménéz ¹

¹ Institut de Physique du Globe de Paris - France

The Monviso meta-ophiolite (Western Alps, Italy) is an oceanic lithosphere relict that experienced high pressure and temperature metamorphism (eclogitic facies, P-T conditions of 600°C and 2.5 GPa) during the alpine subduction. Despite its complex metamorphic history, the massif preserves a complete section of the Tethysian oceanic lithosphere. Here we investigate the mechanisms of carbonate solubilisation at high-pressure/high-temperature by studying a suite of meta-serpentinites and meta-ophicarbonates outcropping near a paleo- oceanic detachment fault in the massif. We show that serpentinites preserve typical features related to high pressure metamorphism, such as secondary olivine and titanoclinohumite formed at the expense of antigorite, brucite and magnetite. The meta-ophicarbonates contain two types of primary carbonates – calcite and magnesite – showing different degrees of decarbonation. In contact with antigorite, magnesite displays coronitic textures made of magnetite-dolomite and tremolite-talc-chlorite assemblages. The calcite can present complex coronas made of andradite, magnetite and ilmenite. These coronas are associated with poorly organized carbonaceous matter, as highlighted by FTIR and Raman microspectroscopy and electron microscopy (SEM). These observations suggest a partial retention of carbon through the reduction of carbonates during high pressure dehydration of the oceanic lithosphere. The reactions leading to carbonate reduction and the amount of carbon devolatilized during these processes will be further investigated via an innovative combination of isotope tracers (C, Fe, Cu, Zn) sensitive to the mobility and redox state of carbon in metamorphic fluids.

Key words: subduction, ophicarbonate, serpentinite, devolatilization, abiotic carbonaceous matter

^{*}Intervenant



The control of the northern and southern Caribbean plate boundaries on the tectonic duality in the back-arc of the Lesser Antilles subduction zone during the Eocene

Nestor Cerpa^{*1,2}, Diane Arcay², Riad Hassani¹, Serge Lallemand², Clément Garrocq², Mélody Philippon³, Jean-Jacques Cornée³, Philippe Münch², Fanny Garel², Boris Marcaillou¹, Bernard Mercier de Lépinay¹ & Jean-Frédéric Lebrun³

¹Géoazur, Université Côte d'Azur, CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur, IRD, ²Géosciences Montpellier, Université de Montpellier, CNRS, Université des Antilles, Montpellier, ³Géosciences Montpellier, Université des Antilles, CNRS, University de Montpellier, Pointe-à-Pitre

The Eocene tectonic evolution of the easternmost Caribbean Plate (CP) boundary, *i.e.* the Lesser Antilles subduction zone (LASZ), is debated. Recent works have shown a peculiar period of tectonic duality in the arc and back-arc regions. A compressive-to-transpressive regime occurred in the north, while rifting and seafloor spreading occurred in the south (Grenada basin). The mechanism for this strong spatial variation and its evolution through time has yet to be established.

In this study, we use 3-D subduction mechanical models to evaluate whether the change in the trench-curvature radius at the northeast corner of the CP could have modulated the duality. We assume asymmetrical CP boundaries at the north (from east to west: oblique subduction to strike-slip) and at the south (subduction-transform edge propagator-like behavior). The initial trench-curvature radius R is imposed. We explore two end-members : $R=200$ km and $R=600$ km, the latter being equivalent to the present-day configuration.

Regardless of the imposed trench curvature, the southern half of our modeled CP undergoes a NW-to-W-oriented extension due to the tendency of the southernmost part of the South- America slab to rollback. In contrast, the tectonic regime in the northeast corner of the CP highly depends on the trench-curvature radius. A low radius promotes transtension-to- transpression, characterized by a NE-oriented compressive component of the principal stress, the magnitude of which also depends on the average friction coefficient at the northernmost subduction interface. A high trench-curvature largely reduces the compressive component and promotes an extensive regime similar to that in the south. We thus propose that an initially low-curvature radius of the NE-LASZ triggered the tectonic N-S duality during the Eocene and led to an ephemeral period of transpression/compression to the north, although an additional mechanism might have been required to locally enhance compression.

Mots-Clés : Subduction, tectonique, arrière-arc, modélisation numérique



Modelling of the post-seismic phase of the Iquique earthquake constrained by GNSS and InSAR observations

Juliette Cresseaux ^{*1}, Anne Socquet ¹, Mathilde Radiguet ¹, Marie-Pierre Doin ¹,
David Marsan ², Mathilde Marchandon ¹, Rémi Molaro-Maqua ¹

¹ ISTerre, Université Grenoble Alpes- France

² ISTerre, Université Savoie Mont Blanc- France

Large earthquakes are followed by a post-seismic period during which the stresses induced by the co-seismic phase are relaxed through different processes, mostly the afterslip and the visco-elastic relaxation in subduction context. It is generally considered that the two mechanisms affect different spatial and temporal scales, the afterslip is prevalent the first months in the surrounding of the fault, while the visco-elastic process affects a bigger area and last a longer time.

Our ultimate goal is to study the large-scale interactions between earthquakes in South-America in particular the 2010, Mw8.8 Maule, 2014, Mw8.1 Iquique and 2015, Mw8.3 Illapel earthquakes sequence. Postseismic processes are a key ingredient to understand these interactions, and in this work our aim is to identify the processes involved after the Iquique earthquake.

The post-seismic phase is explored using a finite element model (2D model, using the FEM software Pylith) that is constrained with InSAR and GNSS data. The GPS time series (processed with GipsyX) include 83 stations. The post-seismic signal is isolated using a trajectory model. The InSAR data consist in Sentinel-1 time series processed with the NSBAS chain, they include 514 interferograms starting 7 months after the earthquake up to the end of 2019. In the FEM we impose a co-seismic displacement on the plate interface and consider the relaxation in the medium. We explore the influence on the predicted surface displacement of the structure and the rheology.

Our initial tests reveals that the viscosity in the continental and the oceanic mantle both have an impact on the displacement produced at the surface, also, the difference between these viscosities controls the movements allowed at depth. We also noticed that the crust thickness and the presence of a cold nose have a clear impact to constrain respectively the wavelength and the location of the maximum of amplitude.

We first adjust our model to explain the long-term viscoelastic deformation. The InSAR data show a clear spatial wavelength with a strong signal 150 to 300 km from the trench. The GNSS data cover a broader area. We highlighted also that a different process is needed to fit the first year of data, this will be modelled by considering in our model afterslip and/or transient viscosity.

Mots-Clés : Modelling, subduction, post-seismic, Iquique



Forearc mantle wedge devolatilization during continental subduction and collision: a reappraisal of Tso Morari (Ladakh, India) serpentinite petrology

Baptiste Debret^{*1}, Pierre Bouilhol², Christian Nicollet³, Sébastien Castelltort⁴,
Pietro Sternai⁵

¹ Université de Paris, Institut de physique du globe de Paris, CNRS, Paris – France

² Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques. Université de Lorraine, Vandœuvre les Nancy – France ³ Laboratoire Magmas et Volcans, Université Clermont Auvergne, CNRS, IRD, OPGC, Clermont-Ferrand – France ⁴ Département des Sciences de la Terre, Université de Genève, Genève – Suisse

⁵ Department of Earth and Environmental Sciences, University of Milano-Bicocca – Italy

The Tso Morari ultra-high pressure continental unit is composed of metasedimentary rocks and eclogite lenses which reached 3.9 GPa and 750 °C. This unit is bounded to the north by the Zildat fault, which contains lenses of serpentinite interpreted as retromorphosed relicts of the forearc mantle wedge. Here we revisit this famous area by presenting new evidences for several stages of forearc mantle wedge hydration and dehydration during continental subduction and collision, respectively.

Relicts of forearc mantle wedge hydration in a subduction like setting are rarely preserved in Tso Morari serpentinites. They mainly correspond to antigorite, sulfide and magnetite inclusions in both metamorphic olivine and humite/chondrodite minerals. The metamorphic climax is marked by the crystallization of granoblastic olivine/humite disseminated within serpentinite matrix and by olivine and humite/chondrodite bearing veins crosscutting massive serpentinites. Based on equilibria between olivine-humite/chondrodite-antigorite, we re-visit the P-T conditions of forearc mantle wedge devolatilization during Himalayan orogeny at 2.5-3 GPa and 500-700°C. These P-T conditions are closed to that of the continental unit, confirming that both units evolved in close association during subduction and collision. Interestingly, the dehydration of Tso Morari serpentinites is also associated with magnesite and dolomite crystallization. These observations suggest an open system high pressure dehydration of forearc serpentinites. Late stages of forearc exhumation during continental collision are marked by the crystallization of a second generation of antigorite associated with brucite and by the devolatilization of carbonate into talc at relatively low pressure (< 1.4 GPa) and temperature (< 450°C).

Mots-Clés : Tso Morari, Himalaya, Subduction, Collision, Forearc Serpentinite, Eclogite



Apport de l'interprétation sismostratigraphique à travers l'arc des Petites Antilles à la compréhension des mouvements verticaux régionaux au cours du Cénozoïque.

Martin Doligez^{*,1,2}, Jean-Frédéric Lebrun², Jean-Jacques Cornée^{3,2}, Mélody Philippon², Marie-Odile Beslier⁴, Lyvane De Min², Mireille Laigle⁴, Serge Lallemand³, Lucie Legendre², Boris Marcaillou⁴, Philippe Münch³, Laure Schenini⁴, et l'équipe GARANTI

1 Institut Polytechnique UniLaSalle, Beauvais, France

2 Géosciences Montpellier, CNRS, U. Montpellier, U. Antilles, Pointe à Pitre,

Guadeloupe³ Géosciences Montpellier, CNRS, U. Montpellier, U. Antilles, Montpellier, France

4 Géoazur, CNRS – IRD - Université Côte d Azur, Obs. de la Côte d'Azur, France

Dans le cadre de l'ANR GAARANTI nous cherchons à caractériser les évolutions paléogéographiques affectant la marge Antillaise au cours du Cénozoïque. Nous avons compilé trois profils de sismique réflexion multitraces régionaux à travers l'arc des Petites Antilles, deux au Nord de la Guadeloupe et un au Sud. Les profils s'étendent depuis le haut de la pente externe de l'avant arc à l'Est jusqu'au milieu du bassin de Grenade en arrière arc, à l'Ouest. Ces profils sismiques proviennent des campagnes CEPM/IFP ANTILLES 5 (1982), SISMAANTILLES 1 (Hirn 2000) et GARANTI (Lebrun et Lallemand 2017). Notre interprétation sismostratigraphique a permis de reconstituer l'architecture sédimentaire des bassins avant-arc, intra-arc et arrière-arc dans la région centrale de la zone de subduction des Petites Antilles. A cette latitude l'arc ancien, Eocène à Miocène inférieur, est aujourd'hui en position avant-arc à l'Est de l'arc actif depuis le Miocène terminal. Les unités sédimentaires sont reconnues jusqu'au socle igné. Un calage stratigraphique cohérent est proposé pour l'ensemble de la région sur la base de contraintes géologiques obtenues dans le bassin intra-arc de Marie-Galante pour les unités de la période Néogène et étendu pour la période Paléogène sur la base de connaissances régionales.

Les profils montrent l'installation de l'arc ancien dans un vaste ensemble effondré plus développé au Sud de la Guadeloupe. Postérieurement au Miocène inférieur la région acquiert une voûture soulevant l'arc qui migre vers l'Ouest (landward). La tectonique extensive s'intensifie au Miocène supérieur autour du nouvel arc conduisant à une réorganisation sédimentaire majeure des bassins de part et d'autre. Nous discutons le rôle de l'érosion tectonique du nez de la marge dans l'acquisition de la flexion et de la fracturation de la plaque supérieure concomitante à la migration de l'arc.

Mots-Clés : Subduction – Petites Antilles – Sismostratigraphie - Cénozoïque – Tectonique Extensive – Migration de l'Arc.



Heat Flow measurements reveal pervasive fluid circulation, related to the subducting slow-spreading oceanic basement, within the Northern Lesser Antilles outer forearc.

Ezenwaka, K.^{1*}, Marcaillou, B.¹, Laigle, M.¹, Klingelhoefer, F.², Biari, Y.¹, Lebrun, J.-F.³, Lucazeau, F.⁴, Rolandonne, F.⁵, Heuret, A.⁶, Pichot, T.²

¹ Université Côte d'Azur, CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur, IRD, Géoazur, 250 Avenue Albert Einstein, 06560 Valbonne, France

² Géosciences Marines, Ifremer, ZI de la Pointe de Diable, CS 10070, 29280 Plouzané France

³ Géosciences Montpellier, UMR5243, Université des Antilles, CNRS, Université de Montpellier, Campus de Fouillol, Pointe-à-Pitre, Guadeloupe (FWI)

⁴ Institut de Physique du Globe, Paris, France

⁵ Sorbonne Université, CNRS-INSU, Institut des Sciences de la Terre, Paris6 Université de Guyane, Cayenne.

Atypical along-dip stability of heat-flow values from the trench to the forearc in the Northern Lesser Antilles reveal the hydrothermal convection of a ventilated fluid system, where the subducting crust consists in exhumed and serpentinized mantle rocks.

We compare the thermal structure of Northern and Central Lesser Antilles along two margin- perpendicular profiles located offshore off Antigua and Martinique Islands, respectively. We perform 2-D steady-state finite elements thermal modelling constrained by heat flow measurements, deep multichannel reflection and wide angle seismic data recorded during the Antithesis cruises. Along the Antigua profile, the heat flow remains atypically constant, at $40 \pm 15 \text{ mW.m}^{-2}$ from the trench to the forearc. This “flat” trend, trench to forearc, contrasts with decreasing heat-flow values 1/ from 70 to 40 mW.m^{-2} along the Martinique profile and 2/ from 55 to 30 Mw.m^{-2} for calculated heat-flow values derived from purely conductive heat transfer. Thus, compared to the typical landward decrease in conductive heat-flow, measurements in the Northern Lesser Antilles reveal a geothermal gradient that is 10-20% lower in the trench and 40-50% higher beneath the forearc.

Offshore of Antigua, geological and tectonic settings favor ventilated-type fluid circulation (see Klingelhoefer et al., this session), which is consistent with the heat-flow stability. In the trench, the subducting oceanic basement, crystalized at the slow-spreading Mid-Atlantic Ridge, partly consists in serpentinized exhumed mantle rock (Klingelhoefer, et al., submit), deeply and pervasively affected by deep ridgeward-dipping shear planes (Marcaillou et al., 2017). This dense and pervasive tectonic fabric favors hydrothermal cooling by downward-flowing fluids and thus low heat flow values. At the forearc, the 50-km-wide deeply-rooted Tintamarre faults system (Boucard et al., submit, and this session) is associated to increased porosity and high water content (Klingelhoefer, et al., submit, and this session). This fault system provides pathways collecting fluids, which results from overpressure and deserpentinisation at depth, generating hydrothermal warming and high heat-flow values in surface.

Mots-Clés : Seismogenic zone, Thermal modelling, Heat flow, Exhumed mantle rocks, Serpentinite dehydration reaction, Northern Lesser Antilles.



The Indian Plate in the Ganges-Meghna-Brahmaputra delta: exploring the thermal effects of extreme sedimentation on the seismogenesis

C. Grall* ^{1,2}, M. Steckler ², J. Pierre ¹, P.M. Betka ³, V. Ballu ¹,
W.R. Buck ², S.H. Akther ⁴

¹. CNRS, LIENSs, La Rochelle University, La Rochelle, France

². LDEO of Columbia University, Palisades, NY, USA

³. George Mason University, VA, USA

⁴. Dhaka University, Dhaka, Bangladesh

Advancing our knowledge of fault behavior and associated seismic hazards at active convergent margins hinges on the thermal structure and the hydrogeology of the system, where sedimentation and sediment recycling are known to exert a strong control on its. On the eastern flank of the India-Eurasia collision, the Indian plate is obliquely colliding beneath southeast Asia. While typical oceanic subduction occurs beneath the Sumatra-Andaman subduction zone, the continuation of this plate boundary to the north encounters the thick sediments of the Ganges-Brahmaputra-Meghna Delta (GBMD). Here, the IndoBurma foldbelt attempts to absorb the ≤ 19 -km thick sediments deposited by the delta. This extreme sediment input should alter the thermal structure of the incoming plate, and in turn bear on the dynamics and the seismogenesis of the subduction. In order to further estimate the effect of this sediment input on the thermal structure of the Indian Plate at the GBMD, we modeled the depositional history of the Bengal Basin and the GBMD since the Cretaceous, by using a thermal basin modelling approach. The Bengal Basin results from the superposition of the heavily-sedimented passive margin of India being overthrust both by the IndoBurma foldbelt from the east and the Shillong Plateau from the north. In response to the India-Asia collision, an immense influx of Himalayan sediment was provided to the Bengal Basin. The shelf edge of the passive margin prograded 300-400 km from the Hinge Zone in the Eocene to its current position forming the GBMD. This history of sedimentation was reconstructed according to published seismic and borehole data from the Surma Basin, a proven Miocene gas province, in the Northeast of Bangladesh. A set of 2D finite element thermal models was conducted. The blanketing effect of sediments (deposition of cold sediments with a low thermal conductivity), the downward thermal advection potentially associated with rapid sedimentation, the fluid generations and upward migrations and the development of overpressure were considered in these models. In all the models explored, the thermal gradient at the surface does not reach a value higher than 15°C/km and significant overpressure develops in the buried marine units below 10-12 km depth, as well as in the Miocene sandy reservoir units. Also, the pressure and temperature at the sediment-crust interface meet the conditions of low grade metamorphism. Such extreme thermo-mechanical conditions in the incoming plate have direct implications on the dynamics and seismogenesis at this tectonic plate.

Mots-Clés : Plate Boundary, Sedimentation, Active Fault, Thermal structure.



Une longue phase de nucléation identifiée par Machine Learning pour les séismes lents des Cascades

Claudia Hulbert ^{*1}, Bertrand Rouet-Leduc ², Romain Jolivet ^{1,3}, Paul Johnson ²

1 Laboratoire de Géologie, Ecole Normale Supérieure
2 Geophysics Group, Los Alamos National Laboratory
3 Institut Universitaire de France

Tout comme les séismes classiques, les séismes lents résultent de l'affaiblissement spontané de l'interface de subduction. Les lois d'échelles caractéristiques de ces événements lents sont aussi identiques à celles valables pour les séismes classiques et, donc, hormis la radiation d'ondes sismiques, les séismes lents sont en de nombreux points identiques aux séismes. Cette similarité nous permet d'analyser des aspects fondamentaux de la nucléation qui ne peuvent être étudiés facilement pour les séismes classiques en raison de la durée très courte de cette phase d'affaiblissement de l'interface de subduction. Nous utilisons sur un algorithme de Machine Learning pour caractériser les temps d'occurrence des séismes lents sous l'île de Vancouver, au Canada. En particulier, notre algorithme détaille les propriétés statistiques des formes d'ondes sismiques enregistrée à la surface au cours du temps pour identifier des patterns permettant la prédiction systématique de l'occurrence des séismes lents.

Nous identifions des cycles dans l'énergie sismiques enregistrée, suivant le cycle de répétition de 14 mois des séismes lents dans les Cascades. Ces cycles suggèrent une certaine prédictabilité de ces transitoires asismiques. Notre analyse montre notamment que l'énergie sismique augmente exponentiellement au fur et à mesure que la rupture se rapproche. Ce comportement est extrêmement similaire à des observations précédentes réalisées sur des séismes lents de laboratoire. Nous interprétons cette croissance exponentielle de l'énergie sismique comme la signature d'un glissement lent émergent, plusieurs mois avant que les déplacements de surface mesurés par GPS ne permettent d'identifier une quelconque activité. Nos résultats suggèrent donc que la phase de nucléation des séismes lents dans les Cascades est de l'ordre de plusieurs mois.

Mots-Clés : Slow slips, nucléation, machine learning



Relier les déformations intersismiques et la croissance de la topographie dans les zones de subduction

Romain Jolivet^{*1,2}, Luca Dal Zilio³, Mark Simons³, Jean-Arthur Olive¹,
Zacharie Duputel⁴, Harsha. S. Bhat¹, Quentin Bletery⁵

¹ Laboratoire de Géologie, Département de Géosciences, École Normale Supérieure, PSL Université, CNRS UMR 8538, Paris - France

² Institut Universitaire de France, 1 rue Descartes, 75005 Paris - France

³ Department of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena, California - USA

⁴ Institut de Physique du Globe de Strasbourg, Université de Strasbourg/EOST, CNRS UMR 7516, Strasbourg - France

⁵ Université Côte d'Azur, IRD, CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur, Géoazur, Sophia-Antipolis - France

Le mouvement de convergence entre deux plaques tectoniques au niveau d'une zone de subduction est accommodé, à faible profondeur, par du glissement sismique ou asismique le long de l'interface de subduction ainsi que par des déformations internes à l'arc de subduction. L'énergie élastique qui résulte du blocage de l'interface de subduction en période intersismique sera relâchée par un glissement sismique ou asismique. Cependant, une partie de la convergence souvent attribuée à des déformations élastiques contribue aux déformations permanentes. Il est nécessaire de quantifier cette énergie « manquante » qui affecte nos estimations de budget sismique de l'interface afin de mieux comprendre le fonctionnement et la sismicité des zones de subduction.

Nous présentons deux exemples afin de discuter des liens entre déformations actuelles, mesurées par GPS et interférométrie Radar et déformations long terme. Tout d'abord, nous décrivons un nouveau modèle de couplage intersismique pour la subduction Himalayenne, mettant en évidence une distribution de couplage hétérogène le long du front Himalayen. Cette distribution est corrélée à l'extension des ruptures passées ainsi qu'à des structures géologiques identifiées et actives sur le long terme. Nous discutons ensuite du cas de la subduction Chilienne. Dans sa partie nord, nous avons mis en évidence une corrélation entre les taux de surrection en période intersismique et sur le quaternaire. Cette corrélation peut s'expliquer par le fait que 4 à 8% de la déformation mesurée en période intersismique n'est pas élastique mais permanente. Une accumulation de périodes intersismiques peut ainsi expliquer les taux de surrection observés à la côte.

Ces observations permettent d'appuyer l'hypothèse que le couplage intersismique de la subduction est pérenne, au moins sur une période équivalente au Quaternaire. De plus, il est important d'inclure ces considérations dans nos estimations de budget sismique des zones de subduction.

Mots-Clés : Subduction, Sismicité, Géodésie, Quaternaire, Topographie



Relation between Fluid Migration and the Deep Crustal Structure at the Lesser Antilles Island arc.

Klingelhoefer, F. ¹, Marcaillou, B. ^{2,*}, Laurencin, M. ³, Boucard, M. ⁴, Laigle, M. ²,
 Lebrun, J.-F. ⁴, Schenini, L. ², Graindorge, D. ³, Evain, M. ¹, Biari, Y. ¹,
 Lucazeau, F. ⁵, Rolandonne, F. ⁶, Kopp, H. ^{7,8}

¹ Géosciences Marines, IFREMER, Centre de Brest, Plouzané, France (ORCID-id 0000-0001-5838-0577)

² Geoazur, Université Côte d'Azur, CNRS, IRD, Observatoire de la Côte d'Azur, Nice, France

³ UMR LGO, University of Western Brittany, Brest, France

⁴ UMR5243 Geosciences Montpellier, Antilles University, Pointe-à-Pitre, France

⁵ Sorbonne Université, CNRS-INSU, Institut des Sciences de la Terre, Paris

⁶ Institut de Physique du Globe, Paris, France

⁷ GEOMAR, Kiel, Germany, ⁸ Christian-Albrechts University, Kiel, Germany

The Lesser Antilles subduction zone is an endmember subduction where old Atlantic oceanic crust (80-100 Ma), formed at the slow-spreading Mid-Atlantic Ridge, is being subducted beneath the Caribbean Plate at a low rate (20 mm/yr). While devastating earthquakes have occurred in the Central Lesser Antilles and in the Greater Antilles, in between, the Northern Lesser Antilles (Montserrat-Virgin Island) subduction have produced very few earthquakes with $M_w > 5$. Here we present a 210 km long trench normal wide-angle seismic model recorded during ANTITHESIS cruise. In contrast with previously published seismic velocity models from the Central Antilles, the velocity structure for the subducting plate suggests that the basement mostly consists of serpentinized mantle rocks, offshore of the Northern Antilles. The mechanical properties and fluid content of this material differ possibly influencing the tectonic deformation, the amount and composition of migrating fluids as well as the seismogenic behavior. Velocity heterogeneities at depth in the upper plate correspond with numerous deep-rooted faults, including the N100-120°-trending Tintamarre normal fault system observed in Multichannel seismic lines. These velocity heterogeneities are thus likely to be related to fault-driven migration of fluids originating from compaction and dewatering of subducting sediment and/or fluids originating from the ultramafic basement rocks deserpentinization. Thus, seismic and bathymetry data reveal vigorous fluid migration through the Northern Lesser Antilles margin, possibly related to deep deserpentinization reactions of ultramafic rocks constituting, at least a portion of the subducting Atlantic crust.

Mots-Clés : Wide-angle seismic, subduction, Antilles



Massive formation of lawsonite in subducted sediments from the Schistes Lustrés (W. Alps): implications for mass transfer and decarbonation in cold subduction zones

Benjamin Lefeuvre^{1*}, Philippe Agard¹, Anne Verlaquet¹, Benoît Dubacq¹, Alexis Plunder²

¹ Sorbonne Université, CNRS-INSU, Institut des Sciences de la Terre de Paris, IStEP UMR 7193, F 75005 Paris, France

² BRGM – Bureau des recherches géologiques et minières (BRGM). 3 avenue Claude Guillemin, 45000 Orléans, France

This study investigates the reactions allowing crystallization of large amounts of lawsonite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot [\text{H}_2\text{O}]$) found in calcschists metamorphosed in a subduction zone setting. Previous studies of lawsonite-forming reactions in metasediments have highlighted its importance for the large-scale budget of CO_2 , as the calcium required to form lawsonite is thought to originate from decarbonation reactions. Yet, thermodynamic modelling as well as isotopic measurements have indicated that 80 to 90% of the carbon is retained in sediments, and there is no evidence of major decarbonation in the field. As lawsonite contains abundant H_2O and has a large stability field, understanding its crystallization is also important to assess fluid migration and mass transfer in a critical part of the subduction system where slow earthquakes are nucleating (such as LFEs or ETS). The upper units of the blueschist facies metasediments of the Schistes Lustrés complex (Western Alps), buried to depths of ~ 30-40 km, have been selected as an ideal case study as they host up to 40 vol.% of lawsonite. Lawsonite is found crystallized over several generations, in veins, in reaction fronts as well as in the rock matrix. Three types of lawsonite were identified. The most abundant type of lawsonite is associated with quartz and ankerite. This mineral assemblage formed from phyllosilicates and calcite in a continuous reaction: $\text{chlorite} + \text{calcite} + \text{kaolinite} = \text{lawsonite} + \text{ankerite} + \text{quartz} + \text{H}_2\text{O}$. According to thermodynamic modelling, this reaction is restricted to a narrow pressure-temperature domain and initiates around 180°C and 0.4 GPa. Lawsonite is also observed and predicted to grow from Fe-Mg-carpholite at higher metamorphic conditions. None of these reactions allow efficient net export of carbon, as one carbonate replaces another, and most observations are consistent with closed-system behaviour at outcrop-scale, in agreement with geochemical studies. At sample-scale and below, crystallization of lawsonite is linked to homogenization of carbonate and pelitic domains in geologically fast reactions. Dissolution of calcite produces reactive fluids prone to react with pelitic domains and crystallize lawsonite and another carbonate. Although metamorphic veins are ubiquitous to the upper units of the Schistes Lustrés Complex, most of them result from local reactions and do not indicate large-scale mass transfer.

Mots-Clés : lawsonite, metasediments, fluid/mass transfer, decarbonation, Schistes Lustrés, seismogenic depths



Various modes of oceanic subduction initiation in a modern Earth

Serge Lallemant ^{*1}, Diane Arcay ¹

¹ Géosciences Montpellier, CNRS, Université de Montpellier - France

To address the question of the triggers and mechanisms involved in the process of subduction zones formation, we have explored all available clues attesting for subduction initiation (SI) during the Cenozoic. We have initially targeted a total of 70 subduction candidates cumulating ~70,000 km of trench, two thirds being still active and a majority still immature. Our strategy consists in defining four stages reached for each subduction candidate starting from incipient-diffuse, incipient-localized, achieved to self-sustained subduction. We have paid special attention to prematurely extinct, i.e., aborted, subduction attempts in order to better understand the reasons for the stoppage of the subduction process, and thence to specify the conditions of success. Failure in subduction initiation results from a combination of hindering parameters (lithosphere cooling, frictional resistance, unfavorable age contrasts for intra-oceanic SI ...) and insufficient external forcings (too low convergence velocity ...). This comprehensive study enables us to observe that new subductions regularly initiate, at a mean rate of about once every Myr, and with a rate of success exceeding 70% to reach subduction maturity, usually within less than ~15 Myr, ~4 Myr for the shortest time lapse from the very early stage to the self-sustained stage. A majority formed at the transition between an ocean and a continent, a plateau or a volcanic arc, thereby demonstrating that large compositional, topographical differences and/or lithospheric weaknesses favor SI. Lithospheric forces are needed to guarantee the success of the process in the early (immature) stages, with the help of mantle forces in one third of the cases. Multiple triggers are common. The stress at SI is compressive in most cases if not all and oriented oblique to the nascent plate boundary in more than half of the cases. The becoming plate boundary generally reactivates a former lithospheric fault, most often with a change in its kinematics. Sometimes, the new lithospheric fault reactivates a former subduction fault. There is no rule regarding the age of the subducting plate which varies from 0 to 140 Ma in the studied examples. In the same vein, the subducting plate is not necessarily older than the overriding plate when oceanic. Both situations are equally observed.

Mots-Clés : subduction initiation, Cenozoic, lithospheric forcing, mantle forcing



Ca-metasomatism of lawsonite eclogite-facies metasediment evidence high-pressure intra-slab C-O-H-S fluid transfer

Antonin Laurent*, Adélie Delacour, June Chevet

Subduction and recycling of the hydrated upper oceanic crust and the overlying sediments into the mantle has the potential to change mantle composition in terms of volatile contents (e.g. S, F, H₂O). Mantle enrichments in turn is responsible for the more oxidized and volatile-rich nature of the magmas generated above subduction zones, compared to the mid-ocean ridge basalts. While the consequences of mantle enrichment are well documented, the metamorphic processes governing fluid release from metasediments and subsequent interaction between the fluid and ultramafic lithologies are still under debate.

Hectometric shear zones preserving eclogite facies metasediments embedded in a soft serpentinite matrix are frequent in fossil ophiolites. The strong chemical and rheological contrast between calcareous sediments and serpentinite may lead to the development of a high-pressure Ca-rich metasomatic rind reflecting high-pressure fluid release and interaction. In the Monviso ophiolite (Western Alps), decametric boudins of calcareous metasediments embedded in (meta-)serpentinite and talc-schists preserve eclogite-facies paragenesis consisting of garnet-lawsonite-chloritoid +/- talc. Preliminary phase equilibria modelling in the CaO-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-O₂ system indicates an equilibrium pressure higher than 2.1 GPa at 500°C under moderately oxidizing conditions. Toward the rim of the metasediment boudin, lawsonite is progressively pseudomorphosed by zoisite/clinozoisite with minor talc and white micas. The lawsonite-out reaction is associated with dehydration monitored by a drop in measured whole-rock LOI from 6-7 wt% down to

2.5 wt%, corresponding roughly to lawsonite and zoisite/clinozoisite water content, respectively. Systematic variation, across the metasomatic front in volatile elements (Be, Cl, F, C, S) highlight the influence of white micas, lawsonite, sulphate/sulphide and carbonate stability as a function of P-T and H₂O-CO₂-O₂ availability. Whole-rock C and S isotopic compositions confirms significant mass transfer from the sediments to the surrounding serpentinite.

Mots-Clés : Western Alps, metasomatism, lawsonite, zoisite, volatile elements



A review of strain partitioning in the Northern Lesser Antilles (Guadeloupe to Virgin Island).

Marcaillou, B. ^{1*}, Laurencin, M ², Boucard, M³, Lebrun, J.-F ³, Graindorge, D ², Klingelhoefer, F ⁴, Laigle, M ¹, Lallemand, S ⁵, Schenini, L.¹

¹ Université Côte d'Azur, CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur, IRD, Géoazur, 250 Avenue Albert Einstein, 06560 Valbonne, France

² Laboratoire Géosciences Océan, CNRS-UBO-UBS, Université Bretagne Pays de Loire (UBL), Institut Universitaire Européen de la Mer, rue Dumont Duville, F-29280, Plouzané, France

³ Géosciences Montpellier, UMR5243, Université des Antilles, CNRS, Université de Montpellier, Campus de Fouillole, Pointe-à-Pitre, Guadeloupe (FWI)

⁴ Géosciences Marines, Ifremer, ZI de la Pointe de Diable, CS 10070, 29280 Plouzané France

⁵ Géosciences Montpellier, CNRS, Université de Montpellier, Université des Antilles, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier, France

Along the convex Northern Lesser Antilles margin, plate convergence obliquity increases northward resulting in subduction normal to the trench to the west of Guadeloupe and highly oblique ($>75^\circ$) to the North of Virgin Island. In this context, tectonic structures related to strain partitioning has long been debated, but are still poorly imaged. In particular, it was proposed that ~800x300km Northern Lesser Antilles Forearc sliver, bounded by a lithospheric strike-slip fault in the volcanic arc moves independently northward as a block distinct from the Caribbean Plate. However, tectonic limits for this major sliver remain poorly imaged.

Geophysical data acquired during the ANTITHESIS cruises, which aim at investigating tectonic deformation related to strain partitioning, depict a different pattern.

1- At the Southern limit of the Puerto-Rico – Virgin Island margin segment the ~400-km-long E-W trending left-lateral Anegada Passage strike slip system is likely to be related to strain partitioning, although lateral motion is very slow.

2- To the South, in the Northern Lesser Antilles margin segment, en-echelon short transtensional faults along the volcanic arc are interpreted as the expression of strain partitioning. This system differs from lithospheric scale, continuous strike-slip systems such as the Great Sumatran Fault, the Median Tectonic Line in Nankai and the Philippine fault. En- echelon systems are typical of early stages of strike-slip deformation before coalescing in mature strike-slip fault.

3- At the front of these margin segments, the ~850-km long sinistral strike-slip Bunce Fault extends to 18.5°N and develops along the mechanical discontinuity between the 20-30-km-widesedimentary wedge and a more rigid backstop. This strike-slip system anastomoses southward within the accretionary prism where the sharp increase in convergence obliquity possibly acts as a mechanical threshold.

Thus, the absence of crustal-scale, long-term strike-slip tectonic system in the arc and the fore- arc, south of the Anegada Passage, casts doubts onto strain partitioning in the Northern Lesser Antilles forearc. Plate motion could be mostly unpartitioned south of the Anegada Passage or taken up along pervasive short systems in a more diffuse pattern at margin scale, possibly owing to low interplate friction or lesser obliquity.

Mots-Clés : Subduction zone, Tectonic deformation, Strain partitioning, Multichannel seismic data, Northern Lesser Antilles.



15-year acceleration along the Japan trench and the Sagami trough

Lou Marill ^{*1}, David Marsan ¹, Anne Socquet ¹, Mathilde Radiguet ¹,
Nathalie Cotte ¹, Baptiste Rousset ²

¹ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, ISTerre, 38000 Grenoble, France

² Univ. Calif. Berkeley, Dept. Earth & Planetary Sci., Berkeley, CA 94720 USA

Recent studies on the Boso peninsula suggest a slow decoupling of the subduction interface along the Sagami trough from 1996 to 2011: Reverso et al. [2016] characterized an acceleration of the background seismicity, and Hirose et al. [2012], Ozawa [2014] and Fukuda [2018] observed a shortening of the recurrence intervals of Slow Slip Events (SSEs). Moreover, Mavrommatis et al. [2014] and Yokota and Koketsu [2015] show changes in the coupling of the subduction interface along the Japan trench.

Motivated by these observations we used GPS (Global Positioning System) time series to study the long-term acceleration of surface displacement offshore Honshu, with a specific focus on the Kanto region. We processed the data in double difference with the GAMIT/GLOBK suite. We analyzed the time series with a trajectory model [Bevis and Brown, 2014] accounting for steps associated with antenna changes and co-seismic offsets, post-seismic signals, known SSEs, the 2000 Miyakejima's volcanic collapse, seasonal variations, as well as a linear and an acceleration term. The need for an acceleration term is tested statistically for each station. The obtained acceleration field is then inverted for acceleration slip on the Japan trench and on the Sagami trough subduction interfaces using a linear least-square method [Tarantola, 2005]. To regularize the inversion, we computed the covariance between model parameters with a decreasing exponential function [Radiguet et al., 2011].

Our results compare well with previous studies done on the Japan trench [Mavrommatis et al., 2014; Yokota and Koketsu, 2015]. We find similar slip acceleration amplitudes of $\sim 3 \text{ mm/yr}^2$ corresponding to $\sim 0.55 \text{ mm/yr}$ of coupling difference. Both the deceleration zone North of Honshu (39° to 41°N) and the acceleration zone further South (37° to 39°N) observed in previous studies are also robust features in our inversions. Our analysis includes data further South than previous studies, and we characterize an acceleration zone under Kanto (35° to 36°N and 139° to 141°E) that had not yet been observed. The slip acceleration in Kanto from 1996 to 2011 is consistent with the acceleration of background seismicity observed offshore Boso [Reverso et al., 2016] and the shortening of the Boso SSEs recurrence intervals [Hirose et al., 2012; Ozawa, 2014; Fukuda, 2018].

Mots-Clés : double difference, GPS processing, Japan trench, subduction interface, Kanto district, GAMIT/GLOBK suite, slip rate acceleration.



Set the cadence of basal-accretion events along the subduction interface: a geological monitoring of the Hellenic margin

Armél Menant^{1,2,*}, Johannes Glodny¹, Samuel Angiboust³, Romain Augier⁴, Onno Oncken¹, Laurent Jolivet⁵, Eloïse Bessi  re⁵, Taras Gerya⁶

¹ GFZ Helmholtz Centre Potsdam, German Research Centre for Geosciences - Allemagne

² Now at: Université Côte d'Azur, CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur, IRD, Géoazur - France

³ CNRS, Institut de physique du globe de Paris, Université de Paris - France

⁴ Université d'Orléans, ISTO, UMR 7327 - France

⁵ Sorbonne Université, UMR 7193 CNRS-UPMC, Institut des Sciences de la Terre de Paris - France

⁶ Institute of Geophysics, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) - Suisse

Subduction margins are the loci of a wide range of deformation processes occurring at different timescales along the plate interface and in the overriding forearc crust. Whereas long-term deformation is usually considered as stable over Myr-long periods, this vision is challenged by an increasing number of observations suggesting a long-term pulsing evolution of active margins. To appraise this emerging view of a highly dynamic subduction system and identify the driving mechanisms, detailed studies on now-exhumed, high pressure-low temperature (HP-LT) accretionary complexes are crucial as they open a window on the deformation history from the plate interface to the surface.

In this study, we combine structural and petrological observations, Raman spectroscopy on carbonaceous material, Rb/Sr multi-mineral geochronology and thermo-mechanical numerical models to unravel with an unprecedented resolution the tectono-metamorphic evolution of the Late-Cenozoic HP-LT nappe stack cropping out in western Crete (Hellenic subduction zone). A consistent decrease of peak temperatures and deformation ages toward the base of the nappe pile allows us to identify a minimum of three basal accretion episodes between ca. 28 Ma and ca. 15 Ma. On the basis of structural evidences combined with numerical modeling results, we argue that this succession of mass-flux events triggered (i) pulses in the strain rate, sometimes associated with a switch of the stress regime (i.e., compressional/extensional) and (ii) vertical surface oscillations eventually resulting in the growth of a high forearc topography. This accretion-controlled, Myr-scale tectonic and topographic signal plays a part in active deformations monitored at subduction margins, though it may remain invisible to most of geodetic methods because of superimposed shorter-timescale transients, such as seismic-cycle-related events.

Keywords: Tectonic underplating; High pressure-low temperature metamorphism; Transient deformation; Forearc topography; Hellenic subduction zone

*Intervenant



Raman Spectroscopy of Carbonaceous Material record in pseudotachylytes: heating or deformation?

Moris-Muttoni Benjamin ^{*1}, Augier Romain ¹, Raimbourg Hugues ¹, Champallier Rémi ¹, Le Trong Emmanuel ¹, Lahfid Abdeltif ²

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

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

The Raman Spectroscopy of Carbonaceous Material (RSCM) allows quantifying the degree of crystallinity of carbonaceous material, which increases upon geological heating. Evolution of crystallinity of CM is now routinely used as a reliable geothermometer. Recently, RSCM approach has been used to evidence frictional heating during seismic events. This new application assumes that CM spectra reflect only the thermal record irrespectively of the potential impact of geological strain on CM crystallinity.

The aim of this study is to reconsider this postulate by using analyses of Raman spectra in order to understand the effects of seismic deformation on the CM structure. For this purpose, we analyzed six pseudotachylyte veins from the Shimanto Belt (Japan) and the Kodiak Accretionary Complexes (USA), through high-resolution cross-sections. Samples are composed of foliated tectonic mélanges cut by millimetric shear planes filled by black vitreous material accompanied by injection veins, and present most of features described in the melt-origin rocks. The Raman peak area ratio as well as the intensity ratio show a drastic increase within the pseudotachylyte compared to the host rock. In addition, these parameters show a very sharp evolution in few microns along cross-sections across the PST boundaries, which is at variance with thermal diffusivity models applicable for others intrusive bodies. In order to understand such an evolution of the Raman parameters, 1D thermal diffusion and kinetics of RSCM evolution based on static heating experiments modellings were applied. Diffusion models show that the temperature of the pseudotachylyte materials and the surrounding rocks drops down very quickly after few milliseconds and returns to the background temperature after few seconds. Additionally, the kinetics modelling shows that a very large temperature must be applied for at least 1.0×10^2 ms to increase the intensity ratio. Furthermore, the cooling down of a molten layer is not able to reproduce the sharp evolution in RSCM parameters across the PST boundaries.

Therefore, these results are not consistent with observation made on natural samples. It suggests that deformation is the main factor controlling CM crystallinity in fault cores. These results therefore also question the maximum temperature reached in fault zones, possibly much lower than previously estimated.

Key-words: Raman Spectroscopy, Carbonaceous Material, Pseudotachylyte, Seismic deformation, Modelling



The early postseismic phase of Tohoku-Oki earthquake (2011) from kinematics solutions: implication for subduction interface dynamics

Axel Periollat^{*1}, Mathilde Radiguet¹, Jérôme Weiss¹, Cédric Twardzik², Lou Marill¹, Nathalie Cotte¹, Anne Socquet¹

¹ ISTerre - Université Grenoble Alpes - France

² EOST - Université de Strasbourg - France

Earthquakes are usually followed by a postseismic phase where the stresses induced by the earthquakes are relaxed. Little work has been done at the transition from the co- to the postseismic phase, and the physical processes involved.

We study the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake, using GEONET GPS data. We focus on the few minutes to the first month following the mainshock.

Following Twardzik et al. (2019), we process 30-s kinematic position time series and we use it to characterize the fast displacements rates that typically occur during the early stages of the postseismic phase. Without including early afterslip, we quantify precisely the co-seismic offset of the mainshock and the largest aftershocks. We analyze the spatial distribution of the co-seismic offsets for the earthquakes also the signal induced by the postseismic phase over different time windows to investigate the spatio-temporal evolution of the postseismic slip.

From the characterization of the first month of postseismic kinematic time series, we find that the best-fitting law is given by an Omori-like decay. The displacement rate is of the type $v_o/(t+c)^p$ with spatial variation for the initial velocity v_o and for the time constant c . We find a consistent estimate of the p -value close to 0.75 over most of the studied area, apart from a small region where higher p values ($p \sim 1$) are observed. We discuss about the implications of these observations in terms of subduction interface dynamics and rheology.

Twardzik Cedric, Mathilde Vergnolle, Anthony Sladen and Antonio Avallone (2019), doi.org/10.1038/s41598-019-39038-z

Keywords: Early Postseismic, Afterslip, GPS, Kinematic, Omori



Hydrogeological properties at the toe of the Nankai accretionary prism, combining drilling and petrophysical data from Hole Coo24A - IODP Expedition 358

Joshua Pwavodi ¹ *, Mai-Linh Doan ¹ and Expedition IODP 358 science team

¹ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, Univ. Gustave Eiffel, ISTerre, 38000 Grenoble, France

Nankai Trough is a locus of slow slips and low-frequency earthquakes. High pore pressure is assumed to contribute to their generation but direct evidence of overpressure has not been provided. We contribute to the understanding of the hydraulic regime within the Nankai accretionary prism by integrating drilling and logging data to get a full picture of hydraulic properties along the hole Coo24A that intersected the Nankai décollement at 813 mbsf, about 3 km from the trench.

Pore pressure was estimated using Eaton's method on both drilling and sonic velocity data. Both results predict local pore pressure gradients rising up to 1.33–1.42g/cm³ and pore pressure rise up to 10% above hydrostatic within the borehole, especially when crossing the décollement.

DownHole Annular Pressure was monitored during drilling and a careful reanalysis of its variation shows localized inflow of fluids from the formation along the borehole. The two asymmetrical damage zones (footwall) below the décollement are especially permeable with significant high porosity and permeability with orders of magnitude between $\sim 10^{-16}$ to 10^{-18} m².

Our results show that the formation fluids are getting significantly over-pressurized only a few hundreds of meters from the toe of the décollement. The décollement is already impermeable across the fault and the fluid flow is channelized along the damage zone of the décollement. The research will furthermore investigate other drilled wells to understand the pressure transient history and correlate these properties with the formation of slips and low-frequency earthquakes in the study area.

Mots-Clés : Fault hydrogeology; Pore pressure; Permeability; Nankai subduction zone; NantroSEIZE; IODP



Systematic characterization of slow slip events along the Mexican subduction zone from 2000 to 2019

Mathilde Radiguet^{1*}, Ekaterina Kazachkina², Louise Maubant¹, Nathalie Cotte¹,
Vladimir Kostoglodov², Adriano Gualandi³, and Kristel Chanard⁴

¹ ISTerre, Université Grenoble Alpes- France

² Instituto de Geofísica, UNAM - Mexico

³ JPL, Caltech, USA. ⁴ Laboratoire

⁴ IGN, Paris, France

Slow slip events (SSEs) represent a significant mechanism of strain release along several subduction zones, and understanding their occurrence and relations with major earthquake asperities is essential for a comprehensive understanding of the seismic cycle. Here, we focus on the Mexican subduction zone, characterized by the occurrence of recurrent large slow slip events, both in the Guerrero region, where the SSEs are among the largest observed worldwide, and in the Oaxaca region, where smaller, more frequent SSEs occur. Up to now, most slow slip studies in the Mexican subduction zone focused either on the detailed analysis of a single event, were limited to a small area, or were limited to data before. In this study, our aim is to build an updated and consistent catalog of major slow slip events in the Guerrero-Oaxaca region.

We use an approach similar to Michel et al. [2018] in Cascadia. We analyze the GPS time series from 2000 to 2019 using Independent Component Analysis (ICA), in order to separate temporally varying sources of different origins (seasonal signals, SSEs and afterslip of major earthquakes). We are able to isolate a component corresponding to seasonal loading, which matches the temporal evolution of displacement modeled from the GRACE data. The sources (independent components) identified as tectonic sources of deep origin are inverted for slip on the subduction interface. We thus obtain a model of the spatio-temporal evolution of aseismic slip on the subduction interface over 19 years, from which we can isolate around 30 individual SSE of equivalent magnitude $M_w > 6.2$.

The obtained catalog is coherent with previous studies (in terms of number of events detected, magnitude and duration) which validates the methodology, but extends further in time. The observed moment-duration scaling is close to $M_0 \sim T^3$, as expected for regular earthquakes, and confirms the observation made by Michel et al. [2020] for Cascadia SSEs, but extends the range of magnitude considered. Finally, we also investigate the spatio-temporal relations between the SSEs occurring in the adjacent regions of Guerrero and Oaxaca, and their interaction with local and distant earthquakes.

Mots-Clés : Slow slip event, subduction, earthquake scaling, Mexico



The record of fluid pressure variations by quartz geochemistry

Hugues Raimbourg^{*1,2,3}, Kristijan Rajic^{1,2,3}, Vincent Famin^d,
Benjamin Moris-Muttoni^{1,2,3}, Giulia Palazzin^{1,2,3}, Donald Fisher^e, Kristin Morell^f,
Saskia Erdmann^{1,2,3}, Ida Di Carlo^{1,2,3}, Clément Montmartin^{1,2,3}

1 Université d'Orléans, ISTO, UMR 7327, 45071 Orléans, France

2 CNRS, ISTO, UMR 7327, 45071 Orléans, France

3 BRGM, ISTO, UMR 7327, BP 36009, 45060 Orléans, France

4 Laboratoire Géosciences Réunion, Université de La Réunion, IPGP, Sorbonne Paris Cité, UMR 7154 CNRS, Saint-Denis, La Réunion, France

5 Department of Geosciences, Penn State University, University Park, PA 16802, USA

6 Department of Earth Science, University of California, Santa Barbara, 1006 Webb Hall, Santa Barbara, CA 93106, USA

Fluid pressure is a key parameter in the brittle, upper portion of the lithosphere, as it controls the stress necessary for faults to slip. In turn, fluid pressure is affected by brittle deformation, as large permeability changes occur during the seismic cycle. The interplay between fluid pressure and deformation is nevertheless mostly a theoretical model, as few data are available regarding the amplitude of fluid pressure at depth and its variations with time.

Quartz veins constitute a potential time record of variations in precipitation conditions, as suggested by microstructures such as crack-seal or growth features. We examine in this work different sets of veins from convergent settings, spanning the seismogenic zone ($T < 250^\circ\text{C}$) to its down-dip transition to aseismic slip ($T \sim 300\text{--}350^\circ\text{C}$). We focused our analysis on trace element composition of quartz, using a combination of cathodoluminescence, laser ablation coupled to mass spectrometry and electron microprobe.

The veins from the seismogenic zone show large variations in trace element concentration, especially Al and Li, which correlate with variations in cathodoluminescence and fluid inclusion density. Two types of quartz therefore coexist, and we interpret the Al- and Li- rich type as having precipitated by rapid, out-of-equilibrium growth, during stages of fluid pressure drops.

In contrast, this trace element-rich type of quartz is absent, or extremely limited, in higher temperature ($T \sim 300\text{--}350^\circ\text{C}$) vein quartz. This absence points to precipitation under constant conditions of fluid pressure, in spite of the presence of crack-seal microstructures, which have been tentatively associated with slow-slip events at the base of the seismogenic zone.

Mots-Clés : Subduction zone, earthquakes, fluid pressure, quartz geochemistry, veins



Deformation and peak-metamorphic temperature in Kodiak accretionary complex, Alaska

Kristijan Rajic ^{*1,2,3}, Hugues Raimbourg ^{1,2,3}, Vincent Famin ⁴, Donald Fisher ⁵,
Kristin Morell ⁶

¹ Université d'Orléans, ISTO, UMR 7327, 45071 Orléans, France

² CNRS, ISTO, UMR 7327, 45071 Orléans, France

³ BRGM, ISTO, UMR 7327, 45071 Orléans, France

⁴ Laboratoire Géosciences Réunion, Université de La Réunion, IPGP, Sorbonne Paris Cité, UMR 7154 CNRS, Saint-Denis, La Réunion, France

⁵ Department of Geosciences, Pennsylvania State University, University Park, PA 16801, USA;

⁶ Department of Earth Science, University of California, Santa Barbara, Santa Barbara, CA 93106, USA

The Kodiak archipelago (Southwest Alaska) represents a well exposed paleo-accretionary prism with its modern equivalent further to the southeast as the Alaskan Trench (Plafker, 1994). The complex consists of northeast-trending metasedimentary and magmatic rocks, whose age span from the oldest Triassic-Jurassic units exposed at northwestern side of the archipelago towards the youngest, Miocene at the southeast. The complex dominantly consists of trench sediments, in which the sedimentary stratification is still visible. In addition, two tectonic mélange zones, composed of lenses of metabasites embedded in sheared metasediments, are intercalated in between the coherent formations. Mélange terrains are characterized by subduction-related deformation, top-to-the-trench shear zones. On the other side, dominant structures in coherent units are conjugate thrust faults and folds, related to the intra-wedge shortening.

Preliminary results of Raman spectroscopy of carbonaceous material (RSCM) provide essential information as to the large-scale thermal structure of the accretionary prism. **(1)** In the investigated profile running from southeastern margin towards the northwest, the temperature does not increase monotonically towards the inner part of the wedge. The highest temperatures (>300 °C) are found within the central part of the complex, in very thick early Maastrichtian turbiditic series accreted in a short period of time in Paleocene. **(2)** There is a large thermal gap at the regional-scale unconformity between the youngest accreted sedimentary early Eocene in age and Oligocene slope sediments. This points to a tectonic event including rapid accretion in Eocene, followed by fast uplift and erosion, subsidence and finally slope sedimentation in Oligocene. **(3)** There is no thermal gap across the Uganik Thrust, a major tectonic fault, what indicates that its activity predates exposure to the peak temperature.

Mots-Clés : Kodiak, accretionary prism, subduction, Raman spectroscopy, geothermometer



Timescales of subduction initiation and evolution of thermal regimes: insights from the Oman metamorphic sole

M. Soret^{1,2*}, G. Bonnet³, P. Agard⁴, K.P. Larson¹, J. Cottle³, B. Dubacq⁴,
M. Button¹, N. Rividi⁵

¹ Earth and Environmental Sciences, University of British Columbia Okanagan, 3247 University Way, Kelowna, British Columbia, V1V 1V7, Canada.

² Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO), UMR 7327, CNRS–BRGM, Université d'Orléans, 45071, Orléans, France

³ Earth Research Institute, University of California, Santa Barbara, Santa Barbara, CA93106, USA.

⁴ Sorbonne Université, CNRS-INSU, Institut des Sciences de la Terre Paris, IStEP UMR 7193, 75005 Paris, France.

⁵ Sorbonne Université, OSU Ecce Terra, CAMPARIS laboratory, 75005 Paris, France.

*Corresponding author: math.soret@gmail.com

Subduction zones are first-order features of plate tectonics on Earth, yet the mechanisms by which subduction initiates remains enigmatic and controversial. In this study, we reappraise the timing of formation of the first fragments detached from the leading edge of the down-going slab during subduction initiation preserved in the Semail metamorphic sole; Oman– United Arab Emirates. Based on petrochronology and phase equilibrium modeling, we demonstrate that subduction initiated prior to 102–100 Ma at a slow rate (< 1 cm/yr). Subduction stagnated at relatively warm conditions (15–20°C/km) for > 5 Myr before evolving into a faster (≥ 2 –5 cm/yr) and colder ($\sim 7^\circ\text{C/km}$) self-sustained regime. Subduction unlocking at 96–95 Ma, through the progressive change of the inter-plate thermo-mechanical structure, triggered the onset of slab retreat, large-scale corner flow and fast ocean spreading in the overriding plate. This study reconciles, therefore, conflicting analogue and numerical subduction initiation models and reveal the thermal, mechanical and kinematic complexity of subduction initiation.

Keywords: Metamorphic sole, Ophiolite, Subduction initiation, Interplate thermo-mechanical evolution



Geodynamic controls at the southernmost Northern Andes magmatic arc: geochemical and geophysical evidence

Witt Cesar^{*1}, Bosch, D², Aizprua, C³, Poujol, M.⁴, Chiaradia, M.⁵

1 Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, F59000 Lille, France

2 Géosciences Montpellier, Université de Montpellier, CNRS, Place E. Bataillon, 34095 Montpellier, France

3 NTNU, Norwegian Institute of Science and Technology

4 Univ. Rennes, CNRS, Géosciences Rennes - UMR 6118, F-35000 Rennes,

France

5 Department of Mineralogy, University of Geneva

Understanding how magmatic arcs develop is crucial for the comprehension of subduction systems and the processes leading to continental growth and lithospheric recycling. Chronologic and provenance from U-Pb single grain dating by LA-ICP-MS of detrital zircons obtained from the forearc basin paired with Hf and O isotopic data and trace elements have provided indicators of the Late Cretaceous-Cenozoic evolution of the Ecuadorian magmatic arc. A major Late Cretaceous accretionary event (75-65 Ma) is marked by large isotopic variations ($\epsilon_{\text{Hf}} > 20$ and $\delta^{18}\text{O} > 8$) attesting for intense magmatism resulting from melting of lower and upper crust materials. Highly fractionated signatures in trace elements and Eu/Eu* paired with $\delta^{18}\text{O}$ mantle-like and ϵ_{Hf} juvenile values prevailed up to 45 Ma, suggesting that the arc was most likely emplaced in an over thickened crust. Subsequently, negative isotopic incursions from 45 to 30 Ma are defined by mantle sources as well as drops in the U/Yb, Eu/Eu* and Th/U ratios laying rough indicators of a broad extensional magmatic arc. From 30 to 10 Ma the arc evolved towards a bi-modal arc, with highly juvenile isotopic values in the North and slightly juvenile values in the south. Temporal trends from detrital analysis are further compared with: 1) in-situ zircon geochemical and isotopic data and 2) geophysical data sets, mostly gravimetric, magnetometric and seismic reflection records. The geophysical analysis provide a good template on the first-order segmentation of this part of the Andes, including deep anomalies related to ancient accreted arcs and/or serpentinized mantle and sub-surface extensional tectonics. These results give fresh perspectives on the long-term evolution of magmatic arcs in accreted oceanic terranes.

Mots-Clés : magmatic arc, subduction, Northern Andes, Ecuador



Evolution and composition of fluid inclusion in the Eclogitic Micaschist Complex (Sesia-Lanzo Zone, Western Italian Alps)

Michele Zucali^{*1,2}, Jinny Sisson², Patrizia Fumagalli¹

¹ Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Milano - Italia

² Earth and Atmospheric Sciences Department, University of Houston, Texas - USA

The Eclogitic Micaschist Complex (EMC) was involved in the subduction processes that led to the development of the European Alps. Their pre-alpine evolution is characterized by an amphibolite-granulite metamorphism that has been attributed to the Permian due to their relations with Permian-age intrusives. The Permian evolution has been related to the lithospheric weakening and thinning that pre-date Triassic-Jurassic rifting. It is not clear if during Mesozoic the protoliths of the Eclogitic Micaschists Complex were exposed at shallower crustal levels. The Eclogitic Micaschist Complex has been thoroughly re-equilibrated under eclogite-facies conditions during the convergence process. Their prograde and retrograde Pressure - Temperature (PT) paths are both characterized by a low thermal gradient ($\leq 15-20^{\circ}\text{C}/\text{km}$), typical of an active subduction process. We studied the fluid inclusions in the EMC, and in particular in a quartz-rich garnet-, chloritoid-, kyanite-bearing eclogitic micaschist. The rocks are characterized by a penetrative foliation supported by the shape preferred orientation of phengitic white mica, chloritoid, kyanite and garnet. Microstructural analysis allowed to recognize two main inclusions types: fault-related and isolated. All of them are two-phases with an aqueous NaCl-H₂O solution. Among fault-related fluid inclusion, two generations have been separated, one associated with vertical faults and the second with gently dipping faults. Either fault types terminate against the main foliation, suggesting they post-date the eclogite stage. Textural constraints suggest that the some of the isolated fluid inclusions pre-date vertical and inclined faults. From measured data we also calculated the density of the homogenized fluid and the isochores to intercept the pressure-temperature conditions of inclusion formation with the PT evolution reconstructed in the literature.

Mots-Clés : subduction, continental crust, composition



T1.13 Bassins sédimentaires : les avancées de la modélisation numérique, de l'échelle lithosphérique à l'échelle de réservoir



Le Concept de Système pétrolier, démarche méthodologique et application possible hors et post Pétrole

Jean-Jacques Biteau*, retraité de Total, Président de Géoliens Alumni ENSG,
ancien Président de l'EAGE

Géoliens Alumni ENSG Nancy

In the 1980's Alain Perrodon (ENSG 1947) wrote a single sentence about the Petroleum System to explain the genesis, the migration and the trapping of Hydrocarbon Molecules :

The Petroleum System (PS) corresponds to the dynamic sequence of all the combined geological elements and processes which, from a Source Rock using a common plumbing system = the Migration pathways to one or several reservoir / seal pair(s) = the Petroleum Play(s) leads to the formation of a genetically related family of Hydrocarbon Accumulations (HCA)"

Nowadays, this definition is not only a legacy but the right way to rigorously tackle all methodological challenges related to Petroleum Exploration, risking, evaluation of uncertainties and creation of economic value.

Are this concept and methodologies available for mining ore exploration or more generally minerals useful for Human activities ?

.

Mots-Clés : Petroleum System , Reservoir, Seal accumulation, exploration, fluid flows



Modélisation numérique de l'évolution syn-orogénique d'une chaîne de montagne et de son bassin d'avant pays associé : influence de la géométrie initiale du bassin d'avant pays.

Benjamin Gérard ^{*1}, Delphine Rouby ¹, Cécile Robin ², Ritske Huismans ³

¹ CNRS, Université Paul Sabatier, Géosciences Environnement Toulouse – France

² Université de Rennes 1, Géosciences Rennes – France

³ Université de Bergen, Département des géosciences – Norvège

Les bassins d'avant-pays (ou foreland) dans des contextes de collision, enregistrent l'évolution des chaînes de montagne associées au cours du temps au travers de la dynamique de leurs dépôts sédimentaires. De nombreuses études explorent les évolutions de l'architecture sédimentaire des bassins d'avant-pays en fonction de variations de paramètres tels que les taux de soulèvement des chaînes de montagne, la propagation du front de déformation, ainsi que les variations climatiques et/ou eustatiques (e.g. Flemings & Jordan (1989) ; Paola (2000)) ; mais l'impact de la géométrie initiale du bassin d'avant-pays sur l'enregistrement sédimentaire (accommodation, taux de sédimentation, volume de matériel stocké, mise en place d'une période de transit sédimentaire, persistance du forebulge au cours du temps) a cependant, peu été abordé.

Nous avons utilisé un modèle numérique d'évolution du paysage au cours du temps (FastScape) afin d'explorer la dynamique « source to sink » d'un demi-orogène et de son bassin d'avant pays associé. À partir d'une topographie quasi-plane, un domaine est en soulèvement constant pendant 25 millions d'années ; le reste du modèle est libre de contrainte et est uniquement soumis à la dynamique de flexure associée à la charge topographique et à celle de la masse des sédiments déposés. Nous avons exploré l'influence de l'altitude initiale du domaine d'avant-pays (0 m vs. 300 m) ainsi que l'existence ou non d'un bassin marin non rempli de sédiments avant la surrection de la topographie de la chaîne de montagne (bassin préexistant d'une profondeur de 1 km sur 100 km de large).

Les résultats préliminaires montrent que la présence d'un bassin initial (avec une tranche d'eau non nulle) prolonge et favorise la préservation du matériel dans le foreland car ce dernier offre un espace supplémentaire aux dépôts sédimentaires, ce qui favorise davantage la flexure associée à la masse des sédiments et donc l'espace d'accommodation. Dans un second temps, qu'un bassin initial soit préexistant ou non, si le foreland est surélevé (300 m d'altitude), moins de matériel sera stocké dans le bassin d'avant pays car les sédiments seront rapidement exportés du domaine du foreland vers des zones marines distales via les réseaux de drainage fluviaux. Enfin, notre travail a permis de mettre en évidence numériquement l'influence de la dynamique sédimentaire au piémont de chaîne sur les taux d'érosion de l'orogène déjà mis en évidence de façon analogique par Babault et al. (2005). En effet, la continentalisation et la mise en place de cône alluviaux au pied de la chaîne entraîne une remontée du niveau de base qui se traduit par une diminution nette des taux d'érosion dans la chaîne de montagne.

Mots-Clés : Bassin d'avant pays, source-to-sink, architecture stratigraphique, transit sédimentaire, préservation du forebulge, taux d'érosion, modélisation numérique



Rock typing et hétérogénéité de la formation des grès de Roda (Eocène inférieur, Bassin sud pyrénéen) : un analogue de terrain aux réservoirs deltaïques

Adrien Henry ^{*1}, Raphaël Bourillot ¹, Perrine Mas ², Rémy Deschamps ³, Benjamin Brigaud ², Eric Portier ², Bertrand Saint-Bezar ², Hugues Fénies ¹, Philippe Razin ¹

¹ Géoressources et Environnement – Université Bordeaux Montaigne EA4592 – Bordeaux INP, France

² Université Paris-Saclay, GEOPS, CNRS, Orsay, France

³ Institut Français du Pétrole, Energies Nouvelles (IFPEN), France

Les propriétés de porosité et de perméabilité déterminent en grande partie la qualité des réservoirs géothermiques. Il existe un réel risque qu'une opération nouvelle n'obtienne pas une ressource géothermique présentant des caractéristiques de porosité/perméabilité et de température suffisante pour assurer la rentabilité du projet pendant sa durée de vie. Ce risque géologique est en grande partie due à l'hétérogénéité du réservoir et à sa prédiction, ce qui constitue un obstacle au développement futur de la géothermie. La difficulté à prédire les hétérogénéités pousse les géologues à caractériser des analogues de réservoir à l'affleurement. Pour les réservoirs silicoclastiques, l'analogue ciblé est la formation des grès de Roda en Aragon, Espagne. Il s'agit d'une formation deltaïque datée de l'Yprésien, déposée dans le bassin de Tresp-Grass. Cette formation constitue, de part une qualité d'affleurement exceptionnel et la présence de forages à proximité des affleurements, un excellent analogue aux réservoirs deltaïques. Sa position dans un bassin d'avant pays tectoniquement actif lors de son dépôt fait que cette formation a été particulièrement influencée par les variations du niveau marin et les plis synsédimentaires. Cette formation a été étudiée par Elf et l'IFPEN dans les années 80-90 et notre étude s'appuie sur de nombreuses données existantes.

Les premiers résultats de terrain et sur les carottes ayant traversés la barre Y montrent une vingtaine de faciès, du delta aux barres tidales. Les porosités, perméabilités, vitesses acoustiques et résonance magnétique nucléaire sur environ 300 plugs sont en cours d'acquisition dans le but de proposer des relations faciès-porosité-perméabilité précises. Les données pétrophysiques issues des échantillons sur carottes et de terrain seront comparées afin de discuter le potentiel rôle de la tétogénèse, qui constitue un problème souvent difficile à quantifier dans les modèles réservoirs d'affleurement.

Mots-Clés : Rock typing, Analogues, Système deltaïque, Hétérogénéité réservoir, Géothermie profonde



Réalisation d'un modèle photogrammétrique d'affleurement des Grès de Roda (Eocène inférieur, Bassin sud-pyrénéen) pour l'étude des hétérogénéités réservoirs (projet UPGEO)

Perrine Mas ^{*1}, Benjamin Brigaud ¹, Raphaël Bourillot ², Adrien Henry ²,
Rémy Deschamps ³, Éric Portier ¹, Bertrand Saint-Bezar ¹, Hugues Fénies ²,
Philippe Razin ²

¹ Université Paris-Saclay, GEOPS, CNRS, Orsay, France

² Géoressources et Environnement – Bordeaux INP – UBM : EA4592, France

³ Institut Français du Pétrole, Energies Nouvelles (IFPEN), France

L'hétérogénéité des réservoirs à différentes échelles est complexe à prédire, et elle constitue un verrou important dans le cadre du développement de la géothermie profonde, car elle impacte entre autres, la réinjection du fluide géothermal dans les réservoirs. Un des objectifs du projet ANR UPGEO (UPscaling and heat simulations for improving the efficiency of deep GEOthermal energy) est de mieux prédire l'hétérogénéité des réservoirs en termes de géométries sédimentaires, de propriétés pétrophysiques (porosité et perméabilité), et de connectivité du réservoir. Dans cet objectif de prédiction, des analogues aux réservoirs géologiques sont recherchés à l'affleurement pour capturer les hétérogénéités sédimentaires à des échelles décimétriques à kilométriques, ce qui permettra d'améliorer la modélisation des réservoirs en subsurface dans les géomodeleurs.

Le système sédimentaire des Grès de Roda constitue un très bon analogue géologique à certains réservoirs silico-clastiques. Ce système sédimentaire est très riche en données, avec des affleurements continus de grande qualité et des forages carottés (entre 50m et 80m d'épaisseur carottée par forage) très près de ces derniers, à quelques centaines de mètres. Il s'agit d'un système deltaïque développé à l'Yprésien (Eocène inférieur) dans le Bassin de Tresp (sud des Pyrénées), ayant fait l'objet de nombreuses études depuis les années 1980 par des entreprises comme ELF, TOTAL et l'IFPEN ainsi que de nombreuses excursions pour les étudiants et les professionnels du domaine des géosciences. Dans le cadre du projet UPGEO, plusieurs acquisitions photos par drone ont été réalisées pour construire un modèle photogrammétrique d'affleurement. Des coupes acquises sur le terrain ont été replacées dans le modèle et ont aidé à l'interprétation et à la reconstitution 3D des corps sédimentaires.

Les données issues de l'échantillonnage sur le terrain ou des puits carottés ont permis, après analyses pétrophysiques d'établir un rock typing (Henry et al., même session). Celui-ci permettra d'associer des valeurs de porosité et de perméabilité pour chaque faciès identifié sur le terrain ou sur les carottes pour construire un modèle géologique habillé en faciès et propriétés réservoir. L'objectif final du modèle sera de constituer une base pour des simulations d'écoulement et de déterminer l'impact des hétérogénéités sédimentaires dans les systèmes réservoir deltaïques.

Mots-Clés : Photogrammétrie, Analogues, Système deltaïque, Hétérogénéités réservoirs, Géothermie profonde



Contribution de la photogrammétrie par drone à la modélisation 3D des hétérogénéités des réservoirs carbonatés (carrière de Massangis, Bassin de Paris)

Hadrien Thomas¹, Benjamin Brigaud¹, Hermann Zeyen¹,
Bertrand Saint-Bezar¹, Thomas Blaise¹, Elodie Zordan², Simon Andrieu³,
Benoît Vincent⁴, Eric Portier^{1,5}, Emmanuel Mouche⁶, Hugo Chirol¹

¹ Université Paris-Saclay, CNRS, GEOPS, 91405, Orsay, France

² Schlumberger, Software Integrated Solutions, Le Palatin 1, 1, Cours du Triangle, 92 936, La Défense, Cedex, France

³ BRGM, 3 Avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060, Orléans, France

⁴ Cambridge Carbonate Ltd., 1 rue de Varoux, 21120, Marey-sur-Tille, France

⁵ CV Associés Engineering, 7 Chemin de la Marouette, 64100, Bayonne, France

⁶ Université Paris-Saclay, CNRS, CEA, UVSQ, Laboratoire des sciences du Climat et de l'environnement, 91191, Gif-sur-Yvette, France

Une acquisition par drone équipé d'un appareil photo, associée avec les techniques de photogrammétrie, a permis de réaliser une modélisation 3D virtuelle d'un affleurement de roches calcaires avec une précision centimétrique. Celui-ci est ainsi rapidement « transportable

» au laboratoire, et permet de localiser les échantillons prélevés, la levée de logs supplémentaires, une cartographie complète et la corrélation des faciès observés sur le terrain. Des données complémentaires peuvent être extraites telles que des mesures de fractures ou de pendages (exemple ici : <https://skfb.ly/6RYGF>). A titre d'exemple, les calcaires du Bathonien de la carrière de Massangis (Bourgogne) ont été investigués avec cette technique. La carrière couvre une superficie de 0,4 km² et a longtemps été considérée comme un analogue à l'affleurement du réservoir géothermique de l'Oolithe Blanche, réservoir situé à environ 1500 m de profondeur en région parisienne. Dans notre cas d'étude, le modèle de la carrière de Massangis représente un bon analogue pour représenter un réservoir microporeux et/ou dominé par une porosité secondaire associée à la dédolomitisation. Les espaces poreux rhomboédriques de type moldique associés à la dédolomitisation sont bien exprimés au sein de très grandes dunes sous-marines de 15 à 20 m de hauteur. La photogrammétrie par drone combinée à l'utilisation du Géomodeleur Petrel® est utilisée pour créer un modèle géologique qui reproduit fidèlement l'architecture des faciès observés dans la carrière. La photogrammétrie par drone peut être combinée avec des travaux de terrain pour décrire et localiser les faciès et ainsi contraindre la distribution spatiale des propriétés pétrophysiques. Elle permet également de contraindre les formes des corps réservoir dans une grille fine (XYZ = 1 m x 1 m x 0.5 m) pour des modèles géologiques statiques plus réalistes. Cette méthodologie rapide va aider à fournir des modèles pétrophysiques 3D, de l'échelle micrométrique (pore) à kilométrique, à partir d'un analogue d'affleurement pour les réservoirs géothermiques et va permettre de développer des simulations hydro-dynamiques de meilleure qualité.

Mots-Clés : Modélisation, Drone, Carbonate, Jurassique



T1.14 Les marqueurs de migrations de fluides sur les marges continentales : processus physico- biochimique



Les sinkholes géants abyssaux du Blake Bahama escarpement : relations entre structures, fluides et physiographie des reliefs carbonatés.

Thibault Cavailhes^{*1}, Hervé Gillet¹, Léa Guiastrennec-Faugas¹, Thierry Mulder¹,
Vincent Hanquiez¹

¹Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (EPOC), Bordeaux

Cette étude fait état de la découverte de dépressions abyssales géantes situées en pied de plate-forme carbonatée bahamienne, le long des structures tectoniques contrôlant la morphologie du Blake-Bahama Escarpement (BBE), cette dernière s'élevant jusqu'à 4000 m au-dessus de la San Salvador Abyssal Plain (SSAP). Nous révélons la présence entre - 4584 m et - 4967 m de 29 dépressions elliptiques montrant des diamètres compris en 255 m et 1819 m pour un relief négatif de 30 m à 185 m. L'alignement de ces dépressions (i) est parallèle au BBE et (ii) aux linéaments structuraux cartographiés sur la zone, et (iii) est exclusivement situé entre 2200 m et 5000 m du pied de l'escarpement sous lequel est présent un « banc » carbonaté. La densité des dépressions est la plus importante dans la convexité du BBE où les linéaments structuraux et escarpements s'intersectent.

Les observations ci-dessus suggèrent une relation atypique entre l'occurrence spatiale des dépressions (interprétées comme des méga dolines ou sinkholes), les structures tectoniques de la plate-forme carbonatée, le « banc » carbonaté présent sous les hémipélagites en pied d'escarpement et la physiographie de la zone. En effet, les entrées d'eau pendant les bas niveaux marins, la dissolution des évaporites par les eaux météoriques, la convection thermique dans la plate-forme et l'entrée d'eau de mer en bord de plate-forme se conjuguent pour favoriser la circulation de saumures et engendrer la corrosion de la plate-forme carbonatée Bahamienne. Ces mécanismes de corrosion sont particulièrement efficaces le long des hétérogénéités structurales (failles et fractures) qui se comportent comme des drains de grande échelle. Ces zones localisent et maintiennent la présence de point bas dans le système carbonaté (dissolution) où les tributaires sédimentaires s'établissent de façon pérenne (canyons notamment). Les saumures, plus denses que l'eau de mer, migrent vers le bord « libre » du système (BBE) et sont piégés dans le « banc » carbonaté qui latéralement disparaît au profit des hémipélagites de faible perméabilité (lateral seal et top seal). Ces dissolutions structuralement contrôlées engendrent des structures d'effondrement dans les hémipélagites sus-jacents (sinkholes géants).

Mots-Clés : Fluids ; faults ; carbonates ; brines ; dissolution ; dolomitization ; corrosion

^{*}Intervenant



Nouvelle approche de l'évolution spatio-temporelle de l'association pockmarks/*Haploops* spp. au large du Croisic

Jean-Baptiste Champilou¹, Agnès Baltzer², Reynaud Marine³, Quentin Dupuy², Grégoire Maillet¹, Maria Pia Nardelli¹ et Edouard Metzger¹

¹ LPG-BIAF, CNRS - UMR 6112, Université d'Angers UFR Sciences, 49000 Angers, France

² LTEG, CNRS – UMR 6554, Université de Nantes, Campus Tertre, 44312 Nantes, France

³ LHEEA, CNRS – UMR 6598, École Centrale de Nantes - SEM-REV, 44321 Nantes, France

Centrale Nantes possède un site d'essais au large de la presqu'île du Croisic, le SEM-REV qui dispose d'une concession du domaine public marin et à terre, sur la commune du Croisic, une base de recherche et maintenance avec un poste électrique raccordé au réseau ERDF. En 2012, un câble électrique a été ensouillé à 1,5 m dans les sédiments et recouvert de matelas en béton à l'aplomb de l'affleurement rocheux du plateau du Four. Il traverse différents environnements sableux et vaseux, et en particulier un écosystème formé par une couverture dense de tubes, bio-construits par des crustacés amphipodes tubicoles du genre *Haploops*. Dans le cadre du consortium WEAMEC), le projet HOOPLA associant universitaires et industriels a bénéficié d'une bourse de thèse pour étudier l'impact de ce câble sur les milieux traversés. Les travaux réalisés montrent que l'expansion des banquettes de *Haploops* atteint plus de 2 km² entre 2017 et 2018 sur 2 sites suivis dans l'estuaire.

Or cette progradation ne se fait que dans les zones où la présence de pockmarks est attestée. De plus, de nouveaux pockmarks sont observés dans les zones nouvellement couvertes par les colonies. Les processus créant ces nouvelles expulsions de fluide restent à investiguer.

Mots-Clés : Banquette à *Haploops*, pockmarks, expulsion, expansion



Les failles polygonales affleurantes du bassin de Grenade : un marqueur de la subsidence différentielle dans le bassin d'arrière–arc des Caraïbes

Aurélien Gay ¹, Crélia Padron ^{2,3}, Solène Meyer ¹, Mélodie Philippon ⁴, Serge Lallemand ¹, Jean-Frédéric Lebrun ⁴, Daniel Beaufort ⁵, Bernard Mercier de Lépinay ⁶, Clément Garrocq ¹, Philippe Münch ¹, Jean-Jacques Cornée ^{1,4}, Marie-Odile Beslier ⁶, Mireille Laigle ⁶, Boris Marcaillou ⁶, et l'équipe scientifique de la mission GARANTI

¹ Géosciences Montpellier, Université de Montpellier, France

² Géosciences Marines, IFREMER, France

³ Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad Simón Bolívar, Venezuela

⁴ Géosciences Montpellier, Université des Antilles, Guadeloupe, France

⁵ IC2MP, HydrASA, Université de Poitiers, France

⁶ Géoazur, Université de Nice Sophia-Antipolis, France

Lors de la campagne océanographique réalisée dans le cadre de l'ANR GAARANTI en Juin 2017, des polygones géants ont été découverts sur le fond du bassin de Grenade, de 1800 à 3000 m de bathymétrie, entre la ride d'Aves et l'arc actuel des Antilles. D'une maille moyenne de 3 à 5 km ils sont clairement visibles sur les données bathymétriques et de réflectivité du sondeur multifaisceaux. En sismique 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. L'intervalle dans le bassin s'enfouit progressivement vers l'arc et les failles polygonales ne sont plus affleurantes sur le fond de la mer. Elles couvrent une superficie totale de plus de 75 000 km², ce qui en fait la plus grande zone de failles polygonales jamais identifiée à la surface de la Terre.

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 ainsi un grand axe qui est de plus en plus long vers le Sud. La perpendiculaire à ce grand axe correspond à l'axe de contraction privilégiée des sédiments argileux ce qui indique que la contraction est de plus en plus marquée vers le Sud selon une seule direction. De plus, cette direction tourne progressivement du Nord au Sud de la zone étudiée en pointant vers le dépôt centre du bassin de Grenade qui est plus profond vers le Sud.

Les profils sismiques SMT à forte pénétration ont ainsi permis de montrer que la couverture sédimentaire est affectée par une fracturation polygonale en réponse à une extension liée à la subsidence différentielle entre la ride d'Aves et le fond du bassin de Grenade depuis le Miocène moyen. Cette extension se déplace vers l'Ouest au cours du temps et la subsidence est beaucoup plus importante vers le Sud.

Mots-Clés : Failles polygonales, Sorties de fluides, déformation précoce, subduction



Le paleo-pockmark géant de Beauvoisin (Drôme, France : initiation, fonctionnement et signification en termes de géodynamique du Bassin du SE de la France

Aurélien Gay¹, Alexiane Favier², Michel Lopez¹, Jean-Luc Potdevin², Nicolas Tribovillard², Valérie Vidal⁴, German Varas⁵, Delphine Bosch¹, Sandra Ventalon³, Thibault Cavailles⁶, Martin Neumaier⁷, Anna Travé⁸, Sidonie Revillon⁹, Olivier Bruguier¹, Doriane Delmas¹, Christophe Nevado¹

¹ Géosciences Montpellier, Université de Montpellier,

France² Géoazur Nice

³ Laboratoire d'Océanologie &

Géosciences⁴ Laboratoire de Physique, ENS de Lyon

⁵ Instituto de Física, Pontificia Universidad Católica de

Valparaíso⁶ Laboratoire EPOC, Bordeaux

⁷ Earth Science and Engineering, Imperial College London

⁸ Department of Mineralogy, Petrology and Applied Geology. Faculty of Earth Sciences,

Barcelona ⁹ SEDISOR, Brest

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. Cela limite très fortement l'intégration des processus à l'échelle de la sortie de fluides (évolution spatiale et temporelle). D'autre part l'imagerie géophysique ne permet d'imager que les structures en fond de mer ou les conduits de migration sous-jacents à une résolution qui ne permet en aucun cas de définir l'architecture interne, 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. La coalescence de ces dépressions mène, à terme, à la formation d'un pockmark géant de 600 m de diamètre environ. A partir d'une analyse stratigraphique fine nous avons montré qu'une seule zone est active à un moment donné et le point d'émission migre latéralement au cours du temps. 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 : Pockmark, cheminée de fluides, cyclicité, bassin sédimentaire



Cyclicité des expulsions de fluides sur le site de Beauvoisin (Bassin Sud-Est, France) : approche par analyse en ondelettes.

Christine Leredde ^{*1}, Aurélien Gay ¹

¹ Géosciences Montpellier, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier - France

De nombreuses études ont montré que les sorties de fluides sont présentes dans tous les bassins à travers le monde, et leur nombre dénote de la quantité importante de fluides expulsés. Cependant, il a été impossible jusqu'à présent d'observer in-situ le fonctionnement de ces structures si ce n'est à travers quelques mesures ponctuelles. Ces dernières n'ont donc pas permis de définir si leur mode d'expulsion était épisodique, cyclique ou catastrophique. C'est pourquoi l'analyse d'analogues fossiles est la seule alternative actuelle pour caractériser la migration et l'expulsion sur de longues périodes de temps.

Dans le Bassin du Sud-Est de la France (Beauvoisin), des sorties de fluides fossiles ont été identifiées dans les Terres Noires callovo-oxfordiennes (Jurassique moyen-supérieur), le long des failles majeures qui structuraient la marge Tethys-Ligure à cette époque. Elles se présentent sous la forme de lentilles carbonatées riches en fossiles, d'abord considérées comme des sites indépendants les uns des autres. Une étude récente a montré que ces lentilles formaient en réalité un pockmark géant de 800 m de diamètre similaire à ceux reconnus sur les marges actuelles (Gay et al., 2019). Ces lentilles s'organisent selon un motif répétitif dans la série sédimentaire, indiquant clairement une cyclicité de l'expulsion de fluides sur une durée d'environ 3,4 Ma.

Comme les outils traditionnels de biostratigraphie ne permettent pas d'obtenir un calage temporel fin, une analyse en ondelettes a été réalisée sur le signal lithologique extrait de la série. Cette analyse a permis de montrer que le signal était gouverné par des fréquences représentées de manière discontinue, représentant probablement les périodes de Milankovitch (obliquité dominante). Un changement climatique pourrait être responsable d'un changement des conditions de température au fond des océans, par exemple au niveau des zones de stabilité des hydrates de gaz, expliquant le caractère cyclique des expulsions.

Mots-Clés : expulsion de fluides, cyclicité, ondelettes



Interactions de fluides (eaux douces, marines, thermales) dans les réservoirs karstiques sous couverture de la marge proximale du Golfe du Lion : le projet DEM'EAUX Thau

Bernard Ladouche¹, Claudine Lamotte¹, Michel Séranne² * et l'équipe scientifique DEM'EAUX Thau

1: BRGM - Montpellier – France

2 : Géosciences Montpellier - Université de Montpellier – France

La zone littorale de la marge proximale du Golfe du Lion présente un substratum calcaire karstifié, recouvert de sédiments post-rift du Néogène. Ce réservoir constitue une zone d'interaction fluides/sédiments et d'échange entre : i) eaux douces karstiques, d'origine météorique, ii) eaux marines issues de la mer ou des lagunes, iii) eaux profondes, thermales et minéralisées.

Le projet DEM'EAUX Thau étudie les réservoirs karstiques profonds en domaine littoral de la région de Thau-Balaruc, entre Sète et Montpellier, afin d'élaborer un outil de gestion des ressources hydriques. Un modèle géologique 3D décrit l'architecture des réservoirs. L'évolution temporelle des paramètres hydrogéologiques, physiques et géochimiques des fluides sont suivis par réseau de 22 forages et sources instrumentés couvrant toute la zone.

Parmi ceux-ci, la source sous-marine de La Vise, au fond d'un cratère régulier de 150 m de diamètre et 25 m de profondeur, émet habituellement des eaux douces qui se mélangent aux eaux salées de la lagune. La source a été équipée depuis 2019 pour des mesures en continu (flux, T°C, pression, conductivité). L'étude montre que La Vise est connectée au réseau karstique alimenté par les précipitations sur les massifs calcaires affleurant dans la région côtière. En temps normal, La Vise émet une eau d'origine karstique (débit entre 60 et 200 ls⁻¹, température proche de 19°C et conductivité électrique autour de 2.5mScm⁻¹). Cependant, les écoulements de La Vise peuvent parfois s'inverser : l'eau saumâtre de la lagune est alors absorbée par la Vise et contribue à saliniser l'aquifère. De tels événements dits « inversac » surviennent sans périodicité (intervalles documentés variant de 26 mois à 20 ans) et durent entre 24 jours et 20 mois. Ils surviennent en contexte de très bas niveau piézométrique, associé à des déficits long-terme de précipitations sur le bassin versant et semblent être déclenchés par de brèves surcotes de la lagune. Un de ces événements a débuté soudainement le 28 novembre 2020. Le suivi en continu / haute fréquence de la piézométrie, température et conductivité électrique dans les forages et sources du réseau de mesures, montre la diffusion du panache d'eau salée dans le réservoir sur des centaines de mètres. Les premières mesures suggèrent l'absorption de volumes considérables d'eau salée (10⁶ à 10⁸ m³) par le réservoir karstique, au cours d'un de ces événements.

Ces résultats posent la question du devenir des sels emmagasinés par le réservoir et du lien avec la dolomitisation des carbonates, observée sur les carottes prélevées en forage. Replacées dans un cadre temporel d'échelle géologique, ces observations ponctuelles peuvent aider à appréhender les processus physico-chimiques d'altération des roches et apporter des réponses aux questions sur le fonctionnement hydrologique au sein des réservoirs.

La plateforme expérimentale DEM'EAUX Thau sur La Vise donne accès à un laboratoire naturel sur les interactions fluide-roche et offre la possibilité d'analyser et de modéliser le fonctionnement d'un analogue de conduit de fluides sur les marges.

Mots-Clés : réservoir ; source sous-marine ; salinisation ; dolomitisation



Suivi de l'inversion du fonctionnement de la source sous-marine de la Vise (près de Sète) du 28 novembre 2020 : apports de la Plateforme expérimentale DEM'EAUX Thau

Bernard Ladouche¹, Claudine Lamotte¹, Michel Séranne² et l'équipe scientifique DEM'EAUX Thau

1: BRGM – Montpellier - France

2 : Géosciences Montpellier - Université de Montpellier - France

La zone littorale de la marge proximale du Golfe du Lion présente un substratum calcaire karstifié, recouvert de sédiments post-rift du Néogène. Ce réservoir constitue une zone d'interaction fluides/sédiments et d'échange entre : i) eaux douces karstiques, d'origine météorique, ii) eaux marines issues de la mer ou des lagunes, iii) eaux profondes, thermales et minéralisées. Le projet DEM'EAUX Thau a pour objectif de comprendre les interactions des différents types d'eau au sein du réservoir.

Dans l'étang de Thau, près de Sète, se trouve la source sous-marine de La Vise, qui émet habituellement des eaux douces d'origine karstique qui se mélangent aux eaux salées de la lagune. Les écoulements de La Vise peuvent parfois s'inverser : pendant ces événements dits

« inversac » l'eau saumâtre de la lagune est absorbée par la Vise et contribue à saliniser l'aquifère. La source de la Vise est instrumentée depuis Juin 2019 afin d'enregistrer en continu le débit, la température et la conductivité de l'eau. Un ensemble de 22 forages et sources, rattachés au réservoir karstique à la périphérie de la source, fait l'objet d'un suivi hydrologique et géochimique.

Le 28 novembre à 09h40, un nouvel inversac a débuté. Le débit émissif de la Vise, de l'ordre de 60 l/s avant inversac, a brutalement fait place à un débit d'infiltration des eaux de l'étang dans l'aquifère, de l'ordre de 350 l/s au début du phénomène, en diminution depuis. La température, initialement régulière autour de 19°C, a brutalement chuté d'environ 1 °C et varie au cours du temps de plusieurs degrés en fonction des conditions météorologiques. La conductivité électrique (proxy de la salinité) est brutalement passée de 2.5 mScm⁻¹ à plus de 60000 mScm⁻¹. Le volume d'eau d'origine lagunaire infiltré dans le karst dépasse 2,4 millions de m³ fin Avril, soient plus de 80 000 tonnes de chlorure. L'intrusion de l'eau saumâtre dans l'aquifère provoque une hausse brutale de la charge hydraulique dans l'aquifère captif des calcaires karstifiés. Ce phénomène se propage rapidement au sein de la presqu'île de Balaruc : une hausse de la piéométrie pluri-décimétrique est observée dans les forages situés aux alentours à quelques kilomètres en amont hydraulique de la source.

C'est la première fois que les flux d'un inversac sont suivis en temps réel. Des analyses chimiques des eaux et des mesures en forage sont également mises en œuvre pour mieux apprécier les conséquences de l'intrusion dans le réservoir karstique. Les échanges d'eaux à l'interface mer - aquifère, suivis par la plateforme expérimentale DEM'EAUX Thau, pourraient représenter un analogue des échanges observés en fond marin, au niveau des pock-marks.

Mots-clés : source sous marine ; flux ; intrusion saline ; réservoir ; observation



Interactions déformation-altération dans un réservoir karstique côtier de la marge proximale du Golfe du Lion : résultats préliminaires du forage carotté du projet DEM'EAUX Thau

Florian Widhen^{1*}, Michel Séranne¹, Grégory Ballas¹, Claudine Lamotte², Bernard Ladouche² et l'équipe scientifique Dem'Eaux Thau

1 : Géosciences Montpellier - Université de Montpellier - France
2 : BRGM – Montpellier - France.

La zone littorale de la marge proximale du Golfe du Lion présente un substratum carbonaté karstifié, recouvert de sédiments post-rift du Néogène. Ce réservoir constitue une zone d'échange entre : i) eaux douces karstiques, d'origine météorique, ii) eaux marines issues de la mer ou des lagunes, iii) eaux profondes, thermales et minéralisées, exploitées par la station thermale de Balaruc-les-Bains, entre Sète et Montpellier. Un forage implanté en domaine littoral (projet DEM'EAUX Thau) permet d'analyser ce réservoir. Le projet dispose en outre de suivis temporels (débit, hauteur d'eau, température et conductivité électrique) des différentes eaux dans les forages et sources avoisinantes permettant d'aborder les circulations souterraines. L'analyse des 300 premiers mètres de carottes du forage (en cours de foration) montre de haut en bas :

- Une couverture de marnes et conglomérats, Miocène, transgressive sur le substratum carbonaté du Jurassique supérieur.
 - Des calcaires oolithiques du Malm affectés de déformation cassante et traversés par des conduits karstiques, fréquemment colmatés par des marnes jaunes du Miocène sus-jacent ou des silts vadoses rouges. Cet intervalle comprend plusieurs venues d'eau localisées. On note plusieurs fronts de dolomitisation secondaire, avec formation de dolomie saccharoïde friable qui se superpose au grainstone oolithique.
 - Un niveau de calcaire mudstone avec interlits argileux présentant de nombreux stylolithes subhorizontaux et des failles normales à faible pendage (<45°).
 - Un réservoir entièrement dolomitisé, affecté d'une importante déformation pénétrative par fracturation et cataclase. Des ultra-cataclasites dans des zones de cisaillement pluricentimétriques, en failles normales à faible pendage se superposent à la déformation pénétrative. Le forage révèle plusieurs réservoirs superposés :
 - Un réservoir karstique superficiel sous couverture, correspondant à l'aquifère principal, caractérisé par un réseau de drains karstiques. Le suivi hydrologique temporel indique que c'est au sein de ce réservoir que l'on rencontre les circulations d'eaux thermales et d'eaux douces froides d'origine karstique. Elles peuvent être temporairement remplacées par des eaux saumâtres d'origine marine (fréquences pluriannuelles, durées plurimensuelles). L'alternance d'eaux douces et marines au sein du réservoir pourrait être mise en relation avec la dolomitisation des calcaires.
 - Un réservoir profond, entièrement dolomitisé, présente de faibles transmissibilités hydrologiques, en lien avec le mode de déformation par comminution (produisant des ultra-cataclasites à faible porosité) dans les zones de cisaillement qui forment un réseau anastomosé dense, dans le massif rocheux. Dans cet intervalle, la dolomitisation précède la déformation.
- Les résultats préliminaires présentés suggèrent que le forage carotté DEM'EAUX Thau offre une fenêtre d'observation sur les interactions fluide-roche et les processus d'altération des réservoirs carbonatés, dans les zones d'échange eaux douces/salées des marges passives proximales.

Mots-clés : interactions fluides-déformation; dolomitisation, forage; carottes



Modeling biogenic gas processes at the basin scale: A case study from the Bay of Biscay

M. Torelli^{1*}, V. Gervais¹, I. Kowalewski¹, S. Wolf¹, C. Gout², R. Traby², S. Dupré³, E. Deville¹

¹ IFP Energies Nouvelles –
France2 TOTAL – France
³ IFREMER – France

Biogenic gas has received increasing attention in the last few decades as a major and cleaner fossil energy source (Rice 1992; Katz 2011). Despite the growing interest for biogenic methane gas, its generation mechanisms are still not well understood. The efficiency of the production process is largely determined by biogeochemical mechanisms at the sea bottom that depend on the quality and quantity of the Sedimentary Organic Matter (SOM). In this study we present a new numerical approach to simulate biogenic methane processes at the basin scale applied to the Bay of Biscay (southwestern coast of France) where a few thousand methane gas seeps have been recorded in the water column at 140-220 m water depths (Dupré et al. 2020). The carbon isotope signature of methane indicates that the system is charged by primary biogenic gas generated from CO₂ reduction (Ruffine et al. 2017).

The new numerical approach accounts for three different SOM fractions: a labile-SOM which is degraded into methane following the model of Middelburg (1989), a thermo-labile-SOM which is transformed into labile-SOM at higher temperatures as function of first order kinetics and a bio-refractory-SOM which is non-reactive and constant during biogenic gas simulations. Finally, the generated gas is distributed in the basin as either adsorbed to the organic matter, dissolved in water, or as free gas in a vapor phase (in decreasing order of importance).

In order to better describe the organic matter deposited in the study area, Rock-Eval analyses were performed on cuttings collected from two different offshore wells (Baudin et al. 2015). The sedimentary column shows very poor Total Organic Carbon content (~0.35% TOC) for the Plio-Pleistocene series whereas the Miocene occasionally shows high values (~10% TOC). The system is charged by gas from a type III continental-derived SOM (HI < 100 mg/gTOC) which is immature (T_{max} < 425°C). The model includes the deposition of Methane Derived- Authigenic Carbonate (MDAC) pavements in the uppermost layers which result from the oxidation of methane during upward migration through Anaerobic Oxidation of Methane (AOM) (Pierre et al. 2017).

A sensitivity analysis was performed on the model input critical parameters to quantify their impacts on the biogenic gas production and expulsion/migration processes and identify the more influential ones. Our results show that the generated methane is mainly transported as dissolved phase in formation water and released as free gas at the water-sediment interface. Migration pathways are mainly vertical, from the Plio-Pleistocene source rocks directly to the seafloor controlled by sediment permeability and geometry. The model reproduces observations such as emission points and distribution of seeps both located at the Aquitaine Shelf edge along a narrow line oriented N-S parallel to the shelf break. The origin of the biogenic methane, which is sourced by an active system from Miocene to Plio-Pleistocene sediments, is discussed and a first quantification of the total amount of emitted gas into the water column over time is performed.

Mots-Clés : Biogenic gas modeling, Methane migration, Sedimentary Organic Matter degradation, Bay of Biscay, Methane Derived-Authigenic Carbonates



Analyse de la déformation sur carottes et diagraphies dans un réservoir karstique côtier de la marge proximale du Golfe du Lion

Florian Widhen¹, Grégory Ballas¹, Johanna Lofi¹, Michel Séranne¹

1 : Géosciences Montpellier - Université de Montpellier - France

Le projet DEM'EAUX Thau étudie un réservoir karstique en zone littorale entre Montpellier et Sète, avec pour objectif l'étude des interactions entre différents types de fluides : 1) eau karstique, douce et froide, d'origine météorique ; 2) eau thermique minéralisée et chaude, d'origine profonde ; 3) eau saumâtre d'origine marine. Un forage carotté est en cours d'acquisition dans ce réservoir et nous disposons à ce jour de 300m de carottes avec un très bon taux de récupération et de diagraphies sur les intervalles 90-160m et 200-300m.

L'analyse des carottes révèle, sous une couverture Miocène de 74m, un réservoir supérieur (74-180m) de calcaires grainstones oolithiques et de mudstones, karstifiés et affectés de plusieurs fronts de dolomitisation secondaire. On observe des fentes de tension sub-verticales, d'épaisseur centimétrique et colmatées par de la calcite sparitique, ainsi que des zones de déformation en faille normale.

On observe ensuite un intervalle de calcaire marneux (180 à 210m) jouant le rôle de couverture. Cet intervalle est affecté d'une forte densité de stylolites subhorizontaux, de 65 à 110 stylolites/m. Leur amplitude millimétrique permet d'estimer une quantité de compaction minimum (raccourcissement) de 6% à 10.7%.

Plus en profondeur, se trouve un intervalle entièrement dolomitisé (210-300m au moins) et intensément déformé de manière pénétrative par un réseau dense de fractures centimétriques, sur lequel se superposent des zones de cisaillement montrant des processus cataclastiques avec forte comminution (réduction de la taille des grains). L'ensemble des failles et zones de cisaillement sont à cinématique normale et présentent de faibles pendages (<45°). Les rares stries observables sont systématiquement proches de la ligne de plus grande pente.

Il est possible d'orienter les structures tectoniques grâce aux outils de diagraphie, notamment l'imagerie optique qui génère des images haute résolution de la paroi du puit. Ces images sont orientées dans l'espace par rapport au nord magnétique. Les failles, stylolites et fentes de tension sont observables sur cette imagerie et corrélés avec les observations sur carottes. On peut ainsi approcher les directions d'extension et les mettre en relation avec l'histoire géodynamique de la région.

La compaction précède la dolomitisation ; ensuite, les failles normales sont formées lors d'une phase extensive d'orientation principalement NE-SW qui pourrait corrélérer avec la surrection de l'isthme Durancien au Crétacé inférieur. En effet, cette déformation est localement oblitérée par de rares stylolites verticaux et de grandes fentes de tension sub-verticales, proches de NS, qui résultent de la compression Pyrénéenne (Crétacé terminal-Éocène).

Mots-Clés : interaction fluides déformation ; fracturation ; cataclase ; stylolites ; failles normales



Oscillations auto-entretenues par injection de fluide dans une couche de grains

Chaimae Alaoui^{*1}, Aurélien Gay², Valérie Vidal¹

¹ Laboratoire de Physique, Ecole Normale Supérieure de Lyon – CNRS UMR5672 - France

² Laboratoire Géosciences Montpellier, Université de Montpellier – CNRS UMR5243 - France

Dans le contexte d'une exploration de plus en plus poussée des marges continentales, les données de sismique ont mis en évidence de très nombreuses structures de migration de fluides qui se traduisent en fond de mer par des pockmarks ou des volcans de boue. Ce phénomène a des conséquences économiques et environnementales. D'une part, l'émission naturelle de gaz et/ou d'huile est souvent la signature de réservoirs sous-jacents d'hydrocarbures ; d'autre part, l'expulsion violente de fluides représente un risque pour les installations en fond de mer (ancres de plateformes, câbles de communication). Ces cheminées n'ont donc jamais été forcées ni même monitorées et l'absence de mesures in-situ limite la compréhension des processus, en particulier mécaniques et physiques.

Dans ce contexte, les expériences de laboratoire constituent une approche complémentaire permettant une étude fondamentale des différents mécanismes à l'œuvre et de comprendre, à différentes échelles, les processus à l'origine de la formation et de l'évolution spatiale et temporelle des structures de migration de fluides. L'expérience consiste à introduire par un injecteur quasi-ponctuel un fluide à débit constant à la base d'une couche de grains immergée dans une cellule expérimentale quasi-bidimensionnelle dite de Hele-Shaw (gap 2 mm). Les grains considérés sont des billes de verre polydisperses. Le résultat majeur est la mise en évidence, pour une gamme restreinte de paramètres, d'oscillations auto-entretenues du jet fluide dans la suspension formée après fluidification de la couche de grains. Une étude quantitative de l'amplitude et de la fréquence de ces oscillations permet de discuter son origine. Ce phénomène en laboratoire pourrait expliquer certains événements d'expulsions autocyclus dans les volcans de boue et les pockmarks, sans évoquer de cause externe (variations climatiques, hydrates de gaz, production de fluides etc.)

Mots-Clés : Volcans de boue, migration de fluide, milieu granulaire, suspensions, jet, physique expérimentale



T1.15 Tectonique, Topographie et Climat et leurs impacts sur les paléo-environnements et la biodiversité



Histoire de la végétation et du climat de la Méditerranée sud occidentale entre – 8 Ma et 2,6 Ma (Apport de l'analyse pollinique).

Bachiri Taoufiq Naima^{1*}, Barhoun Nadia¹, Suc Jean-Pierre², Popescu Speranta-Maria³, Targhi Soukaina¹, Ouadiriou Khadija¹ et Kirfatlane Zineb¹

¹ Université Hassan II de Casablanca, Faculté des Sciences Ben M'Sik, Maroc

² Sorbonne Université, CNRS-INSU, Institut des Sciences de la Terre Paris, France

³ GeoBioStratData.Consulting, 385 Route du Mas Rillier, 69140 Rillieux la Pape, France.

L'histoire de la végétation des plaines littorales d'Afrique du Nord (Maroc et Tunisie) au Néogène supérieur peut être restituée en utilisant des grains de pollen contenus dans les sédiments marins du corridor rifain (Bachiri Taoufiq & al 2008), des bassins Boudinar Melilla-Nador (Feddi & al 2007, travaux en cours) et de la Tunisie. Ces sédiments ont enregistré des changements de végétation importants au cours du Tortonien supérieur, Messinien inférieur, Messinien supérieur (pré-évaporitique) et au Pliocène inférieur. Cette étude présente une reconstitution de la végétation et du climat de ces quatre tranches de temps.

Durant le Tortonien supérieur la végétation est dominée par les herbacées qui s'étendent à basse altitude. La mangrove à *Avicennia* occupe le littoral. En moyenne altitude, les végétaux subtropicaux et tempérés-chauds sont diversifiés et prédominent dans les sites exposés à l'Océan Atlantique. L'humidité continue à régner dans ce domaine au Tortonien supérieur, alors que, dans le domaine méditerranéen, la xéricité augmente progressivement à cause probablement de la disparition des espaces marins dans le bassin de Taza-Guercif.

Au Messinien inférieur, le climat devient de plus en plus sec, peut être en relation avec la baisse du niveau marin enregistrée à la limite Tortonien-Messinien. Les éléments subtropicaux, tempérés chauds et *Cathaya* prédominent et se développent d'avantage vers l'Ouest.

Au Messinien supérieur et dans le domaine méditerranéen (bassin de Melilla-Nador), les éléments tropicaux sont rares et les subtropicaux sont moins diversifiés. La végétation herbacée à éléments subdésertiques domine, ceci en relation avec la diminution de l'humidité.

À partir de 3,5 Ma (Plaisancien) la mise en place des cycles glaciaire-interglaciaire a entraîné le développement d'*Artemisia* et l'apparition de quelques arbres d'altitude tels que *Cedrus* qui indique un changement de végétation lié à un changement climatique. La végétation sur le pourtour du sud-méditerranéen au Pliocène était semblable à celle du Miocène. Elle était généralement de type xérique ouvert, dominée par les herbes, incluant des éléments subdésertiques. La xéricité est une caractéristique constante du littoral de la Méditerranée sud-occidentale. Les steppes étaient déjà bien développées avant l'arrivée et la forte pression de l'Homme sur l'environnement (Suc, 1989 ; Fauquette et al., 2007, Suc et al., 2018).

En conclusion, on remarque la présence d'un gradient de xéricité qui augmente dans le temps et ceci de l'Ouest vers l'Est. L'absence des éléments tropicaux au Pliocène inférieur suppose que le climat du Tortonien supérieur et du Messinien était plus chaud que celui du Pliocène inférieur.

Bachiri Taoufiq N., Barhoun N., Suc J.-P., 2008. *Geodiversitas*, 30, 1,

41-58. Feddi N., Fauquette S., Suc J.-P., 2011. *Geobios*, 44, 57-69.

Fauquette S., Suc J.-P., Jiménez-Moreno G., Micheels A., Jost A., Favre E., Bachiri-Taoufiq N., Bertini A., Clet- Pellerin M., Diniz F., Farjanel G., Feddi N., Zheng, Z., 2007. Schmidt D.N. éd., The Micropaleontological Society, *The Geological Society, London*, Special Publications, 481-502.

Suc J.-P., Popescu S.-M., Fauquette S., Bessedik M., Jiménez-Moreno G., Bachiri Taoufiq N., Zheng Z., Médail F., 2018. *Ecologia Mediterranea*, 44, 53-85.

Mots clés : Analyse pollinique, Végétation, Climat, Néogène supérieur, Méditerranée sud occidentale (Maroc, Tunisie).



Le bassin sous couverture de Brécy (sud du bassin de Paris): plus de 3500 m de sédiments permien préservés - quelles implications?

Laurent Beccaletto¹*, Sylvie Bourquin²

¹ BRGM - France

² CNRS - Géosciences Rennes, Université de Rennes - France

L'ère glaciaire de la fin du Paléozoïque (LPIA, 340-300 Ma) a été l'un des événements glaciaires les plus importants de l'histoire de la Terre, avec un maximum de glaciation autour de la limite Carbonifère-Permien. Le réchauffement global qui s'en est suivi a entraîné une diminution des calottes glaciaires jusqu'au maximum climatique du Trias inférieur (i.e. Olenekien). Dans ce contexte, les rôles respectifs de l'évolution du climat et de la tectonique (local vs global, i.e. soulèvement et effondrement de la chaîne hercynienne vs dérive des terres émergées) sont sujets à de nombreux débats. Une clé pour comprendre l'impact de ces deux paramètres sur l'enregistrement sédimentaire serait d'étudier les domaines terrestres intertropicaux de la fin du Carbonifère au Permien, où de nombreuses séries sont préservées. Cependant, dans le domaine terrestre, il est difficile de trouver un enregistrement continu de la sédimentation et des calages stratigraphiques, en particulier en Europe de l'Ouest.

Sur la base d'une réévaluation des données de forages, de l'interprétation de centaines de kilomètres de profils sismiques nouvellement retraités, et d'une comparaison avec les données de subsurface des bassins de Decize-La Machine et d'Autun, nous suggérons que le bassin de Brécy dans le sud du bassin de Paris est constitué d'une série sédimentaire de plus de 3500 m d'épaisseur démarrant dans le Carbonifère supérieur (Stéphanien) et atteignant le Permien supérieur. Cette zone pourrait être le "chaînon manquant" entre les bassins du sud de la France et ceux du nord de l'Europe pour comprendre l'évolution carbonifère-triasique en Europe occidentale.

La présence de plus de 3500 m de sédiments permien préservés dans le sud du bassin de Paris pose par ailleurs les questions de la représentativité des affleurements connus, de l'extension latérale et du volume des sédiments permien présents avant le dépôt des premiers sédiments triasiques, des paramètres géodynamiques internes et externes contrôlant la sédimentation à la fin et après l'orogénèse varisque, et de la transition (mode de subsidence) avec le bassin de Paris mésozoïque.

Mots-Clés : Permien, Bassin de Paris, forages, interprétation sismique, subsidence, préservation



Les bassins carbonifères-permiens en France imagés par les données de subsurface: vers une meilleure compréhension des dynamiques syn- et post-varisques

Laurent Beccaletto^{1*}

¹BRGM Orléans - France

Le BRGM a initié dans les années 2000 un vaste programme de retraitement de profils sismiques industriels acquis dans années 1980-90 dans les différents bassins sédimentaires français. Plusieurs milliers de kilomètres de profils sismiques ont été ainsi retraités, donnant accès à un considérable jeu de données de subsurface. L'interprétation de ces profils nouvellement retraités a donné et donne encore de nombreux résultats, que ce soit dans les domaines académiques ou appliqués.

En particulier l'interprétation de ces profils sismiques a permis une avancée majeure dans la connaissance et la compréhension des bassins sédimentaires carbonifères et permien présents en subsurface sur notre territoire.

Cette présentation sera axée sur quelques exemples de travaux récents menés dans le bassin de Paris par le brgm seul ou en collaboration (thèse, post-doc): bassins de la région Centre- Val-de-Loire, bassins houillers du Nord-Pas-de-Calais et de Lorraine. Ces différents bassins, déposés en contextes tectoniques variés, seront décrits en terme de géométrie et replacés dans le contexte plus large de la dynamique varisque et post-varisque.

La remise au goût du jour de ces bassins carbonifères et permien cachés sous couverture méso-cénozoïque apporte de nouvelles informations sur leur mode dépôt, leur contexte structural, leurs extensions et épaisseurs, et donc sur les volumes de sédiments mis en oeuvre et préservés à cette époque.

Ces résultats appellent de nouvelles réponses sur le rôle croisé de la dynamique varisque au sens large et des conditions paléoenvironnementales prévalant à cette époque.

Mots-Clés : bassins sédimentaires, Carbonifère, Permien, retraitement sismique, interprétation sismique, géométrie, géodynamique varisque.



Contrôles locaux vs globaux sur les alternances carbonates-silicoclastiques dans le bassin de Lorca (Tortonien-Messinien, Espagne)

Cédric Carpentier ^{1*}, Emmanuelle Vennin², Nicolas Olivier³, Jean-Jacques Cornée⁴, Bertrand Martin-Garin⁵, Christian Hibschi¹

¹ UMR 7359 CNRS GeoRessources, Université de Lorraine, France

² Biogéosciences, UMR 6282 CNRS, Université Bourgogne Franche-Comté, France

³ CNRS, IRD, Laboratoire Magmas et Volcans, Université Clermont Auvergne,

France⁴ Géosciences Montpellier, Université des Antilles-Université de

Montpellier, France ⁵ CEREGE UMR 7330, Université Aix-Marseille, France

Le Bassin de Lorca, situé dans les Bétiques internes au SE de l'Espagne, présente un remplissage tortonien et messinien marqué par l'alternance d'épisodes silicoclastiques (cônes alluviaux, Gilbert delta, fan deltas) et d'épisodes carbonatés coralliens. Ce bassin a été soumis à d'importantes décharges terrigènes du fait de sa position plus interne par rapport à d'autres bassins néogènes des Bétiques. Les très bonnes qualités d'affleurement et la taille relativement réduite des systèmes sédimentaires permettent une observation détaillée des transitions latérales et de l'empilement vertical des faciès. Un travail basé sur une cartographie détaillée, une interprétation des géométries sédimentaires en termes de progradation, aggradation, rétrogradation, une analyse de faciès et une étude structurale ont permis de déterminer l'impact des facteurs globaux et locaux sur les alternances de dépôts terrigènes et carbonatés bioconstruits et leur timing séquentiel.

Les carbonates s'installent pendant les phases transgressives contemporaines d'événements de structuration extensive du bassin. Dans les séries tortoniennes, la succession rétrogradante depuis les faciès proximaux de plage conglomératique vers les faciès récifaux majoritairement à *Porites* est affectée par des failles normales elles même scellées par les faciès calcarénitiques progradants en sommet de formation. Il apparaît clairement que l'augmentation d'accommodation et l'installation des carbonates est au moins en partie contrôlée par la tectonique extensive. Néanmoins, dans les secteurs situés entre les zones d'apports terrigènes, la prolifération des constructions coralliennes et le maximum de production carbonatée s'effectuent pendant la progradation de haut niveau marin. A l'inverse, au début du Messinien, dans l'axe des zones d'apport, des récifs à *Tarbellastraea* se développent uniquement pendant les périodes de reprise d'augmentation de l'accommodation. Par contre, à cette époque, les phases de progradation sont marquées par le retour des dépôts silicoclastiques incompatibles avec la croissance corallienne et la production de carbonates. Il apparaît donc que, même si l'évolution structurale du bassin joue un rôle sur l'installation des systèmes carbonatés, des facteurs locaux, en particulier l'emplacement des zones de décharges terrigènes, impacte de façon significative la position séquentielle des phases de croissance coralliennes.

Mots-Clés : Carbonates, systèmes mixtes, Tortonien, Messinien, Espagne



Re-visiting the Huon (Papua New Guinea) coral reef terraces: high resolution topography and modeling

Gino De Gelder ^{*1}, Anne-Morwenn Pastier ², Denovan Chauveau ³, David Fernández-Blanco ⁴, Christine Authemayou ³, Kevin Pedoja ⁵, Laurent Husson ¹

¹ ISTerre – Université Grenoble-Alpes - France

² GFZ Potsdam - Germany

³ LGO, IUEM, CNRS, Université de Brest - France

⁴ Barcelona Center of Subsurface Imaging, Department of Geosciences – Spain

⁵ Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Cotière, Université de Caen– France

Coral reef terraces (CRT) are key indicators of Quaternary sea level fluctuations, and are therefore relevant to a wide spectrum of climatic and tectonic studies. The Huon Peninsula in Papua New Guinea is a classic site, containing one of the first CRT sequences to be mapped, measured and dated in detail. Pioneering studies were limited by the available techniques to assess the large scale terrace sequence morphology, and thus to constrain spatiotemporal uplift rate variations that are key to determine past relative sea-level (RSL). We re-visit the Huon CRTs to refine tectonic uplift rates and RSL, using digital surface models calculated from 0.5m Pleiades satellite imagery. This allows us to constrain in detail both the variations in CRT elevation and tectonic deformation wavelengths. We then use coral reef models to reconstruct the sequence morphology and constrain the possible range of RSL over the past few glacial-interglacial cycles. We find that large-scale tilting of the terrace sequence is generally N-directed, which is compatible with large E-W striking splay thrust faults to the S of the Peninsula. Our analysis implies changes of several meters for RSL highstand estimates compared to previous studies. We compare our results to other terrace sequences, and discuss the potential of combining high-resolution topography with coral reef modeling to constrain RSL.

Mots-Clés : Coral reef terraces, tectonics, sea-level



Late Carboniferous paleoelevation of the Variscan Belt: a stable isotope paleoaltimetry study in the French Massif Central

Camille Dusséaux^{*1}, Aude Gébélín¹, Andreas Mulch^{2,3}, Gilles Ruffet⁴

¹ SoGEES, University of Plymouth, UK

² Senckenberg Biodiversity and Climate Research Centre (SBiK-F), Frankfurt, Germany

³ Institute of Geosciences, Goethe University Frankfurt, Germany

⁴ CNRS (CNRS/INSU) et Université de Rennes 1, Géosciences (UMR6118), France

We present the first stable isotope paleoaltimetry estimates for the internal zones of the eroded Variscan Belt of Western Europe based on the hydrogen isotope ratios (δD) of muscovite from syntectonic leucogranites that have been emplaced at ~ 315 Ma. We focus on the Limousin region (Western Massif Central, France) where peraluminous granites are spatially associated with strike-slip and detachment shear zones that developed as a consequence of Late Carboniferous syn- to post-orogenic extension and merge to the northwest with the South Armorican Shear Zone.

The NE corner of the Millevaches massif is located at the junction between brittle and ductile fault systems that acted as preferential pathways for Earth surface-derived fluids. These meteoric fluids penetrated the crust at depth and reached the ductile segment of the low- angle Felletin detachment zone. Using microstructural, thermometry, hydrogen isotope geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological data, we show that these Variscan meteoric fluids interacted with hydrous silicates during high temperature deformation between at least ~ 318 and ~ 310 Ma. Based on the measured $\delta D_{\text{Muscovite}}$ values ranging from -116 to -105‰ in mylonitic leucogranite and a temperature of hydrogen isotope exchange of $540 \pm 51^\circ\text{C}$ deduced from the Ti-in-muscovite geothermometer, we calculate an average $\delta D_{\text{meteoric water}}$ value of $-96 \pm 8\text{‰}$.

For paleoaltimetry purposes, we reference our hydrogen isotope record of ancient meteoric fluids from mylonitic rocks to time-equivalent (~ 300 Ma) oxygen isotope records retrieved from freshwater shark remains preserved in the Bourbon l'Archambault (BA) basin that developed in the external zones of the orogen. Using a hydrogen isotope lapse rate of $-22\text{‰}/\text{km}$, a $\sim 76\text{‰}$ difference in $\delta D_{\text{meteoric water}}$ values between the Millevaches massif and the BA basin ($\delta D_{\text{water}} = -20 \pm 6\text{‰}$) permits paleoaltimetry estimates attaining 3400 ± 700 m. Obviously, we are limited in extrapolating isotope elevation relationships into the distant past; however, the rather large difference in δD values between the foreland basin and the orogeny interior suggests that the hinterland of the Variscan belt of western Europe acted as a barrier to moisture from the south-south-east and was probably high enough to induce an orographic rain shadow to the north.

Mots-Clés : Variscan; shear zone; detachment; Massif Central; hydrogen isotope;

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology; meteoric fluids; stable isotope paleoaltimetry



Tracing thermal history of the central Patagonian Andes with detrital multi-dating of foreland basin deposits

Marie Genge^{1,2*}, Massimiliano Zattin², César Witt¹, Alexis Derycke³, Cécile Gautheron³, Stefano Mazzoli⁴, Marcelo Marquez⁵, Maurizio Petrelli⁶, Nathan Cogné⁷

1 Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, F 59000 Lille, France

2 Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova, via G. Gradenigo 6, 35131 Padova, Italy

3 Université Paris-Saclay, CNRS, GEOPS, 91405, Orsay, France

4 School of Science and Technology, Geology Division, University of Camerino, Italy

5 Servicio Geológico Minero-Argentino, Delegación Patagonia, Barrio Don Bosco km 8, Comodoro Rivadavia, Argentina

6 Department of Physics and Geology, University of Perugia, Perugia, Italy

7 Univ Rennes, CNRS, Géosciences Rennes, UMR 6118, 35000, Rennes, France

Detrital thermochronology in wide foreland basins documents erosion of diverse sediment source areas along an adjacent orogen through time. This study presents new detrital apatite thermochronology data (U-Pb and fission tracks) from the whole central Patagonian foreland (44°S – 48°S) that identify at first a persistent volcanic input from Oligocene to late Miocene. The apatite U-Pb dating was effective to discriminate AFT ages related to either the exhumation of the source or the volcanic input, which can easily overtake the exhumation signal along the Patagonian Andes. Lag time, calculated from the youngest AFT component (~30 Ma) and stratigraphically constrained with new zircon U-Pb ages, indicates that the entire central Patagonian Cordillera was probably in steady-state erosion at ca. 30 Ma until the resumption of shortening during the late Neogene. Furthermore, these new detrital thermochronological data emphasize a signal of low rate post-orogenic erosional processes (0.1 – 0.4 km/Ma) corresponding to a significant unroofing of 2 – 4 km between the Oligocene and the late Miocene; a period characterized by a relative tectonic quiescence, subsequent to the late Early Cretaceous – middle Eocene interval in which significant deformation took place.

This study identifies sediment contribution from different source areas to the central Patagonian foreland and constrains the timing and rates of the post-orogenic cooling along the central Patagonian Andes, thus defining great sediment sourcing from the Andes in spite of tectonic quiescence.

Mots-clés : detrital thermochronology, double dating, lag time, central Patagonia

*Marie Genge



River incision on volcanoes: Case study of La Réunion, Mauritius and Rodrigues islands, Indian Ocean

Loraine Gourbet ^{*1}, Sean F. Gallen ², Vincent Famin ¹, Laurent Michon ¹, Anne Replumaz ³

¹ Université de la Réunion - IGP - France

² Colorado State University - USA

³ Institut des Sciences de la Terre - France

Volcanic islands are geological and biological hotspots. The evolution of volcanic islands landscapes depends on the age of volcanism, the history of subsidence and uplift, and climatic variations. In these environments, erosion is characterized by frequent landslides, large-scale collapses, and landscape dissection by bedrock river incision. Case studies of La Réunion [1] and Tahiti-Nui [2] showed that present-day island landscapes can preserve an imprint of volcano structures. On Mauritius, alternating quiescence and volcanic activity periods affect river development [3]. Despite their importance, few studies address the links between volcanic architecture and erosion.

Here, we focus on La Réunion, Mauritius and Rodrigues islands to study the relative influence of structural inheritance and precipitation on river evolution. Topographic and river profile analysis of Mauritius Island suggests that its relief is largely inherited from volcanic structures. In contrast, most rivers on Rodrigues Island show concave-up profiles, with knickpoints at high elevation that are characteristic of headward erosion.

We assess the bedrock erodibility and its potential link with climate gradients by modelling river incision through time. First, we reconstruct the pre-incision topography by interpolating relict volcanic surfaces [4]. Then, using a Bayesian approach applied to the stream power law [5] and taking into account the precipitation distribution, we invert river profiles in order to obtain three parameters: the erodibility K , the drainage area exponent m , and the slope exponent n . This method could potentially be used as an indirect dating tool for volcanic surfaces. We will discuss our results and their implications on the geodynamical relationships between the three islands and the Réunion hotspot.

References

- [1] Gillot et al. (1994)
- [2] Hildenbrand et al. (2008)
- [3] Saddul (1995)
- [4] Gayer et al. (2019)
- [5] Gallen and Fernández-Blanco (2021)

Mots-Clés : Erosion, volcanic islands, climate



Miocene rainfall in the South Tibetan Detachment as a proxy of tectonic regime and past topography

*Aude Gébelin¹, Christian Teyssier², Andreas Mulch³, Richard D. Law⁴, Igor M. Villa⁵, Michael A. Cosca⁶

¹School of Geography, Earth and Environmental Sciences, University of Plymouth, UK

²Earth and Environmental Sciences, University of Minnesota, USA

³Senckenberg Biodiversity and Climate Research Centre (BiK-F); Goethe University Frankfurt, Germany

⁴Dept. of Geosciences, Virginia Tech, USA

⁵Institut für Geologie, Bern, Switzerland; Università di Milano Bicocca, Milano, Italy

⁶USGS Central Mineral and Environmental Resources Science Center, Denver, USA

The South Tibetan detachment (STD) parallels the east-trending axis of the Himalayan range over > 1500 km and represents an untapped source of information to understand the Cenozoic evolution of coupled climatic and tectonic processes of the world's highest mountain range.

Various tectonic models have been proposed to explain “extrusion” of the Himalayan crystalline core (HCC) above the MCT and below the STD in Miocene time. These models predict different timing and structural contexts, but all consider that exhumation of the HCC occurred in a convergent tectonic setting.

Here, we present hydrogen isotope (dD) geochemistry and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology data from NW India to Mt Everest that document infiltration of meteoric fluids into the active STD footwall at ~24 Ma (Zaskar) and ~15 Ma (Everest) when recrystallized hydrous minerals equilibrated with low-dD water during high-temperature deformation (~550±50°C). The presence of surface-derived water at depth suggests that such fluids have penetrated the mylonitic STD footwall by the combined effects of porosity and permeability pathways in the overlying Tethyan Himalayan Sequence (THS). High heat flow emanating from the metamorphic footwall may have driven convection of these meteoric fluids, resulting in large fluxes of fluids that likely interacted with the top few hundred meters of the footwall. From these data, we propose that exhumation of the HCC during the early-mid Miocene was coeval with: a) migration of Earth's surface fluids down to the ductile crust during diachronous (W- E younging) synconvergent extension of the THS, b) high thermal gradients at depth and, c) high topography.

In addition, such meteoric fluids can be used as palaeoelevation proxies if they can be temporally and kinematically linked to the evolution of the STD. Our results demonstrate the power of shear-zone based paleoaltimetry in eroded mountain belts and suggest that the South Asian monsoon may have started during the early Miocene.

Mots-Clés : South Tibetan Detachment ; Meteoric fluid-rock interaction ; Hydrogen isotope ; ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology ; Miocene elevation, Synconvergent extension



Impact of the Southern Ecuadorian Andes on isotopes in precipitation

*Aude Gébelin¹, Cesar Witt², Maksymilian Radkiewicz¹, Andreas Mulch³

¹School of Geography, Earth and Environmental Sciences, University of Plymouth, UK

²UMR8187 LOG, Université de Lille, France

³Senckenberg Biodiversity and Climate Research Centre, 60325 Frankfurt, et Institute for Geosciences, GoetheUniversity Frankfurt, 60438 Frankfurt, Allemagne

The Andes are a non-collisional subduction orogen and represent one of the main topographic features on Earth. However, uncertainties remain about how long this belt has been acting as a barrier to atmospheric circulation and moisture transport. At present most studies aiming at understanding the link between geodynamic processes, topography and climate focus on the Southern and Central Andes and neglect the role of the Northern Andes in the overall long-term landscape evolution. This negligence is due to the lack of paleoaltimetry data obtained in the Northern Andes, and especially in the Ecuadorian Andes where a strong debate about the timing of its topographic growth is going on.

A fundamental requirement when using stable isotope data for paleoaltimetry reconstructions is the determination of modern $\delta^{18}\text{O}$ and δD vs. altitude gradients. Here, we present the first comprehensive study of this empirical relationship across the Southern Ecuadorian Western Cordillera and the Inter-Andean depression by analysing surface waters from tributaries from five transects. The surface waters sampled from near sea level and up to ~4000m had their elevations corrected by the ArcGIS Flow Accumulation Model, in order to account for the average elevations of individual catchments.

The results for the two domains show a decrease of $\delta^{18}\text{O}$ with elevation which fits a linear regression with a slope of $-0.18\text{‰}/100\text{ m}$ ($R^2 = 0.73$, $n=83$). However, the west facing slopes of the Western Cordillera are subject to moisture incoming from the Pacific which gets adiabatically lifted and produce a lapse rate of $-0.15\text{‰}/100\text{m}$ for $\delta^{18}\text{O}$ ($R^2 = 0.88$, $n=19$) and $-1.4\text{‰}/100\text{m}$ for δD ($R^2=0.93$, $n=19$) that can be served as a guide for stable isotope paleoaltimetry reconstructions at tropical latitudes.

In contrast, $\delta^{18}\text{O}$ and δD values from the Cuenca region, in the Inter-Andean valley and further south in the Nabón Basin, do not show a clear correlation with elevation interpreted to reflect a combination of factors including air mass mixing, evaporation, humidity.

In agreement with previous studies conducted in Ecuador and other tropical regions, our work demonstrates that an empirical relationship between elevation and the stable isotope composition of precipitation and surface waters can be established at (or near) the Equator.

Mots-Clés : Western Southern Ecuadorian Andes ; Inter-Andean depression ; Stable isotope paleoaltimetry ; Isotopic lapse rate ; Tropical precipitation



Tectonic reshaping of the biosphere

Laurent Husson ^{1*}, Florian Boucher², Pierre Sepulchre³, Pieter Van der Beek⁴,
Xavier Robert¹, Matthias Bernet¹, Arjan de Leeuw¹

¹ ISTerre, CNRS, Université Grenoble-Alpes,
France ² LECA, CNRS, Université Grenoble-Alpes, France

³ CEA-CNRS-UVSQ, LSCE/IPSL, Université Paris Saclay, Gif-Sur-Yvette,
France ⁴ GFZ, Potsdam, Germany

The richness of biodiversity is often scrutinized through the lens of mountain belts, because their typical altitudinal and latitudinal expressions provide grounds for solid arguments on the biodiversity mechanisms at play. We carried out a meta-analysis of species range worldwide, and show that regions of high biodiversity cluster in regions that are tectonically active, but not only in mountain belts, and even more strongly in oceans than in continents.

Further, biodiversity relates to tectonic strain rates, in other words the rate at which the landscape is remodeled. We contend that it is the time derivative of the physiography (and of its functional characteristics) and not its instantaneous state that dictate the amount of species that a given region may host. The rate at which habitat connectivity is disrupted or the transience of niches seemingly prevails over the long-term stability of dispersal routes and habitat morphologies. Future research should consider the dynamics of the solid Earth as a primordial control on the distribution of species at its surface.

Mots-Clés : biodiversity, tectonics, strain rates



Reconstitutions paléoenvironnementales des bassins fini-carbonifères à permien en contexte tardi-orogénique (N-E du Massif central) : implications paléogéographiques et géodynamiques

Mathilde Mercuzot^{*1}, Sylvie Bourquin¹, Laurent Beccaletto², Pierre Pellenard³,
CélineDucassou¹, Romain Rubi⁴, Georges Gand³

¹Géosciences Rennes - UMR 6118, Université Rennes 1, CNRS, France

²BRGM, Georesources Division, Orléans, France

³Laboratoire Biogéosciences, UMR CNRS 36282/uB, Université Bourgogne Franche-Comté, Dijon, France

⁴Dept. of Physical Geography and Quaternary, University of Liège

Les bassins intracontinentaux fini-carbonifères à permien du nord-est du Massif central s'inscrivent dans la dynamique fini-paléozoïque, dans le cadre de l'extension tardi-orogénique de la chaîne varisque.

Les bassins d'Autun et de Decize-La Machine (région de Lucenay-lès-Aix, en subsurface) ont fait l'objet d'une étude visant à mieux caractériser les environnements de dépôt sédimentaires, basée principalement sur des données de forages carottés. Les carottes ont été décrites en termes d'associations de faciès, permettant de déterminer les environnements de dépôt et leur évolution au cours du temps.

Dans le bassin d'Autun, les dépôts silicoclastiques grossiers témoignent de dépôts deltaïques (du topset au bottomset) et turbiditiques, intercalés dans des lithologies plus fines (argiles à sables fins) représentées par des varves et des niveaux de black shales, très riches en matière organique, caractéristiques d'environnements lacustres plus ou moins distaux.

Dans la région de Lucenay-lès-Aix, les environnements sont plus proximaux, dominés par des environnements deltaïques et de plaines d'inondation côtières matérialisées par des niveaux de charbon. Ces données sédimentologiques ont été complétées par des données diagraphiques et des données sismiques permettant d'extrapoler les environnements de dépôt à plus large échelle spatiale, de corréliser les séries entre elles et de mieux contraindre l'architecture régionale.

Dans les deux bassins étudiés, des dépôts lacustres distaux sont observés au niveau des bordures actuelles, indiquant que lors de leur remplissage, les bassins étaient de plus grande taille. La similarité des dépôts entre les deux bassins et des données paléobiogéographiques suggèrent que ces bassins aient pu être connectés, hypothèse suggérant des implications géodynamiques importantes n'ayant pas encore été prises en compte dans les modèles climatiques et reconstitutions paléogéographiques.

Mots-Clés : Carbonifère, Permien, sédimentologie silicoclastique, bassin lacustre, paléogéographie



Permian loess and dust in the Lodève basin (France)

Lily S. Pfeifer¹, Gerilyn S. Soreghan¹, Stéphane Pochat², Jean Van Den Driessche³

¹School of Geosciences, University of Oklahoma, 100 East Boyd Street, Norman, Oklahoma 73019, USA,

²CNRS UMR 6112, Université de Nantes, Laboratoire de Planétologie et de Géodynamique, 2 rue de la Houssinière, Nantes F-44000, France

³Université de Rennes, CNRS, Géosciences Rennes-UMR 6118, F-35000 Rennes, France

French Carboniferous–Permian sedimentary basins record intramontane paleoequatorial climate during Pangean assembly, ice-age collapse, and megamonsoon inception. Herein we present data to elucidate the provenance, depositional character, and climatic signals recorded in the ~1.5 km-thick Permian Salagou Formation (Lodève Basin, southern Massif Central, France). The Salagou Formation predominantly consists of fine-grained red beds – Transitioning up-section from internally massive red mudstone (with local pedogenic features) to mudstone commonly interbedded with sedimentary structures that record intermittent shallow water. We interpret these strata to reflect eolian transport and ultimate deposition as loess, or in shallow, ephemeral lacustrine environments. Provenance analyses record rapid (1–17 mm/year) exhumation of local Variscan basement during early Permian syn-orogenic extension. The coarse-grained nature of protoliths and geochemistry data that suggests minimal chemical weathering suggests that the generation of silt occurred by physical (cold-weathering processes). This work adds to a record of voluminous loess across low-latitude Pangea that archives a dusty atmosphere, potentially linked to glaciated alpine terranes. Finally, analysis and modeling of rock magnetic data records Milankovitch-scale paleoclimatic variability (predominant orbital eccentricity-scale, ~10-m-thick) through the middle to late Cisuralian (ca. 285–275 Ma) and optimal sedimentation rates between 9.4–13 cm/kyr.

Key words : Permian, loess, Lodève Basin, Provenance, Variscan Mountains



Evolution de la circulation océanique dans l'Atlantique Nord au Miocène : impact de la calotte glaciaire groenlandaise et du passage de la Tethys

Quentin Pillot ^{1*}, Anta-Clarisse Sarr ¹, Jean Baptiste Ladant ², Yannick Donnadieu ¹

¹ CEREGE, Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, Coll. France, France.

² Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE/IPSL, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris- Saclay, France.

L'un des moteurs de la circulation océanique globale actuelle est la formation d'eau profonde en Atlantique Nord (NADW pour North Atlantic Deep Water). Ce phénomène est associé à l'existence d'une configuration particulière des continents et des passages océaniques qui favorise sa formation. Les données sédimentaires datent la mise en place de cette NADW entre le début de l'Eocène (~49 Millions d'années, Ma) et le début du Miocène (~23 Ma). L'objectif de cette étude est de quantifier l'impact de la géographie du Miocène sur la NADW grâce à de nouvelles simulations réalisées avec le modèle couplé océan-atmosphère IPSL- CM5A2. Nous nous focalisons sur la fermeture du passage est-téthysien (datée entre 22 et 14 Ma), qui permettait la connexion entre les océans Atlantique et Indien et sur une calotte de glace recouvrant le Groenland dont la date de mise en place est proposée autour de 7 Ma mais reste sujette à discussion. Nos résultats montrent que la fermeture du passage est-téthysien semble pas avoir eu un impact significatif sur la mise en place de la NADW, car les eaux provenant de l'océan Indien n'atteignent pas la zone de formation d'eau profonde dans l'Atlantique Nord quand le passage est ouvert. Ceci est contraire à ce que suggèrent certaines études de modélisation. A l'inverse l'existence d'une calotte de glace sur le Groenland est favorable à la formation de NADW car la différence d'élévation orographique induit un changement dans la circulation atmosphérique et sur les courants marins. Au Miocène les épisodes possibles de glaciations du Groenland ont donc pu favoriser et amplifier la formation de NADW.

Mots-Clés : Circulation océanique, Miocène, NADW, Modélisation du climat



A Burma terrane related to India: Evidence from the U-Pb zircons in Late Cretaceous-Paleogene sediments from the Myanmar Central Basins

Pierrick Roperch ^{*1}, Jan Westerweel ¹, Guillaume Dupont-Nivet ^{1,2}, Nathan Cogné ¹,

¹ Géosciences Rennes, CNRS, Université de Rennes1, Campus de Beaulieu, Rennes - France

² Potsdam University, Institute of Geosciences, Potsdam-Golm - Germany

Recent paleomagnetic data from Myanmar demonstrate that the Burma Terrane (BT) underwent an impressive northward translation alongside India in the Cenozoic (Westerweel et al., 2019, 10.1038/s41561-019-0443-2).

Thick sedimentary basins, filled during the Cenozoic, characterize the geology of the BT and were first considered as the receptacle for the erosion products of the India-Asia collision (Métivier et al., 1999; 10.1046/j.1365-246X.1999.00802.x). More local sources have however been proposed for the infill of the Eocene Myanmar basins often presented as forearc and backarc basins of an Andean-type magmatic arc along the western margin of Sibumasu with uplifted parts of Eastern Myanmar e.g. Mogok Metamorphics and Shan Plateau as additional sediment sources (Licht et al., 2013, 10.1144/jgs2012-126, Licht et al. 2016, 10.1111/bre.12108; Cai et al., 2019, 10.1046/j.1365-246X.1999.00802.x; Najman et al., 2020, 10.1016/j.epsl.2019.115948). However, the Late Eocene equatorial position of the BT implies that the Myanmar sedimentary basins were far away from a potential source in eastern Myanmar and challenges all these previous interpretations. We review the numerous studies on detrital zircons (>5000 zircons) from the Late Cretaceous - Paleogene sediments of the Myanmar central basins. While the age spectrum is dominated by a mid-Cretaceous peak compatible with the main magmatic event along the Myanmar magmatic arc or the Gangdese arc, more than 40% of the zircons from sediments of the Central Basins have pre-Cretaceous ages. There is a clear correlation in the distribution of these ages with those from the Triassic turbidites of the Pane Chaung Fm. of the Indo-Burman ranges (Yao et al. 2017, 10.1016/j.tecto.2017.09.016) and the Triassic sediments from the Tethyan Himalaya. This observation clearly supports a paleogeography where the Burma terrane is on the India plate and linked to Greater India during the Paleogene.

The large northward motion of the BT likely also impeded active subduction below Myanmar during the Paleogene. Filling of the BT sedimentary basins is clearly controlled by Cenozoic tectonics north of the BT due to the collision of India first with the trans-Tethyan arc and then with Asia.

Paleoenvironments of Myanmar need to be reinterpreted using the new paleogeography.

Mots-Clés : Myanmar, Tectonics, sedimentation



Évolution asynchrone des pluies et des vents de mousson au cours du Miocène.

Anta-Clarisse Sarr ^{1*}, Yannick Donnadiou ¹, Clara Bolton ¹, Jean Baptiste Ladant ²,
Alexis Licht ¹, Frédéric Fluteau ³, Marie Laugié ¹, Delphine Tardif ^{1,3},
Guillaume Dupont-Nivet ^{4,5}

¹CEREGE, Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, Coll. France, France.

²Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE/IPSL, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris- Saclay, France.

³Institut de physique du globe de Paris, CNRS, Université de Paris, France.

⁴Géosciences Rennes, UMR CNRS 6118, Univ Rennes, France.

⁵Institute of Geosciences, Potsdam University, Allemagne

L'évolution de la mousson Sud-Asiatique au cours du Cénozoïque et les facteurs à l'origine des changements enregistrés par les proxies restent largement débattus. Une intensification des pluies de mousson au début du Miocène (23-20 Millions d'années Ma), enregistrée dans les sédiments issus de la chaîne himalayenne est généralement attribuée au soulèvement de cette dernière. A l'inverse, les enregistrements paléocéanographiques de l'ouest de l'océan Indien suggèrent plutôt la mise en place de moussons intenses autour de 13 Ma, associée à l'intensification du Jet de Somali responsable également de l'existence d'upwelling au large des côtes de l'Arabie. Dans cette étude nous réconcilions ces observations à première vue divergentes à l'aide d'un modèle atmosphère-océan-biogéochimie océanique. Nos résultats montrent que les facteurs environnementaux forçant la circulation et les précipitations associées à la mousson sont découplés et diachrones : le soulèvement de l'Himalaya contrôle l'évolution de la distribution des précipitations au début du Miocène, avec un impact limité sur les vents et les courants océaniques. A l'inverse, l'évolution de la paléogéographie du Moyen-Orient joue un rôle essentiel dans la mise en place de la circulation atmosphérique actuelle, permettant l'initiation d'un upwelling important dans l'ouest de la Mer d'Arabie. Notre étude souligne ainsi une histoire polygénétique de la mousson Sud Asiatique : si la forte saisonnalité des précipitations qui caractérise la mousson apparaît comme un élément persistant du climat Sud-Asiatique depuis au moins le Paléogène, la circulation atmosphérique caractéristique de la mousson actuelle n'a été acquise que récemment, au cours de la fin du Néogène.

Mots-Clés : Mousson, Miocène, Upwelling, Modélisation du Climat, Asie



Contrôle paléogéographique des moussons asiatiques au Cénozoïque : le Tibet et (surtout) tous les autres

Delphine Tardif ^{1,2*}, Anta-Clarisse Sarr ¹, Frédéric Fluteau ², Wesley Banfield ¹, Clara Bolton ¹, Yannick Donnadiou ¹, Guillaume Dupont-Nivet ^{3,4}, Jean-Baptiste Ladant ⁵, Guillaume Le Hir ², Alexis Licht ¹, Quentin Pillot ¹, Fernando Poblete ⁶, Pierre Sepulchre ⁵, Ning Tan ⁷, Agathe Toumoulin ¹

¹ Aix Marseille Université, CNRS, IRD, INRA, Collège de France, CEREGE, Aix-en-Provence, France
² France2 Institut de physique du globe de Paris, CNRS, Université de Paris, 75005 Paris, France

³ Géosciences Rennes, UMR CNRS 6118, Univ Rennes, Rennes, France
⁴ France4 Institute of Geosciences, Potsdam University, Potsdam, Germany

⁵ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE/IPSL, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France

⁶ Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Chile

⁷ Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Les moussons Sud et Est asiatiques sont des phénomènes climatiques qui conditionnent aujourd'hui la production de nourriture de millions de personnes. Résultant de l'interaction entre le battement saisonnier de la Zone de Convergence Intertropicale, les gradients de température de surface et la géographie du pourtour de l'Océan Indien, la question de leur mise en place, ou de leur intensification, au cours du Cénozoïque reste un sujet débattu, qui met en lumière notre compréhension encore imparfaite de leurs forçages principaux. Si la présence d'un plateau Tibétain suffisamment haut a souvent été présentée comme la condition *sine qua non* à la présence de moussons en Asie, cette vision a depuis été largement remise en question. De plus, des données récentes suggérant des moussons précoces dès l'Éocène supérieur (~40 Ma), soit dans un contexte climatique et paléogéographique bien différent des conditions actuelles, contribuent également nuancer ce rôle hégémonique joué par le Plateau Tibétain. Afin de tester la sensibilité de la circulation atmosphérique asiatique à d'autres forçages paléogéographiques, mais également climatiques, la modélisation paléoclimatique est un outil de choix.

Avec le modèle de système terre IPSL-CM5A2, nous simulons l'évolution du climat asiatique au cours du Cénozoïque. Les paléogéographies utilisées dans nos simulations paléoclimatiques compilent l'état de l'art des connaissances actuelles sur l'évolution de la distribution terre-océan et de la topographie. Des paléogéographies alternatives sont également testées, afin de préciser l'impact d'une région particulière sur le climat, ou lorsqu'il n'existe pas de consensus sur la morphologie d'une région précise à une période donnée. L'application de diagnostics de moussons, régionaux et saisonniers, sur les climats simulés nous suggère une mise en place asynchrone des différentes caractéristiques des moussons asiatiques modernes. Par ailleurs, nos résultats mettent en exergue le rôle fondamental joué par l'exondation de la plaque Arabe, ainsi que par la surrection des reliefs Iraniens, Est-Africains et Mongols sur la circulation atmosphérique asiatique, qui apparaissent au moins aussi importants que la surrection du complexe Himalaya-Tibet.

Mots-Clés : Cénozoïque, mousson, paléogéographie, Tibet, Iran, Afrique de l'Est, Arabie,



Mongolie, pCO₂, climat

Timing of Deuterium and Argon mobility along the Zaskar Detachment Zone: the deep reach of meteoric water

I.M. Villa ¹*, A. Gebelin ², R.D. Law ³, T. Webster ², A. Mulch ⁴, C. Teyssier ⁵

¹ Institut für Geologie, Universität Bern, 3012 Bern, Suisse, et Università di Milano Bicocca, 20126 Milano, Italie; ² School of Geography, Earth and Environmental Sciences, Plymouth University, PL4 8AA, Royaume Uni

³ Dept. of Geosciences, Virginia Tech, Blacksburg, VA 24061, USA

⁴ Senckenberg Biodiversity and Climate Research Centre, 60325 Frankfurt, et Institut für Geowissenschaften, Goethe-Universität, 60323 Frankfurt, Allemagne

⁵ Dept. of Geosciences, University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455-0149, USA

The South Tibetan Detachment (STD) is a > 1500 km mylonitic zone, hundreds of metres thick, separating Palaeozoic sediments in the hanging wall from high-grade metamorphic rocks and syntectonic leucogranites (Greater Himalayan series, GHS) in the footwall.

Infiltration of meteoric fluids has been documented in the deformed footwall of the STD at ca. 15-17 Ma in the Mt. Everest area where hydrous minerals equilibrated with surface-derived fluids during deformation [1]. Such minerals provide important information on the fluid source and migration pathways associated with shear zones, as well as the fluxes of fluids involved in fluid-rock interaction that in turn place limits on the thermomechanical behaviour of the STD. Such fluids also yield paleoaltimetry estimates [2].

Here, we present hydrogen isotope (δD) data combined with microstructural observations and ³⁹Ar-⁴⁰Ar dating from the Zaskar detachment zone (ZDZ), a local name for the STD in NW India, that extend the spatial distribution of records from the Mt. Everest region. Hydrogen isotope ratios (δD) of synkinematic biotite, muscovite, and chlorite collected within the top 450 m of the ZDZ footwall are as low as -146‰, -127‰, -140‰, respectively. Together with microstructural data, these results suggest that the rhomboidal shaped mica fish interacted with meteoric fluids sourced at high elevation during high temperature (re)-crystallization / deformation. In contrast, below 450 m down to 2 km, biotite and muscovite yielding higher δD values that range from -80‰ to -97‰, and from -60‰ to -68‰, respectively, indicate interactions with deeper crustal fluids.

One sample < 10 m from the ZDZ fault plane contains two chemically and chronologically distinct muscovite generations: Ms1, enriched in large mica fish and ca. 26 Ma old, and Ms2, ca. 24.5 Ma old, whereby step ages of both aliquots anticorrelate with the Ca/Cl ratio. The other six biotite and muscovite samples (> 200 m) give slightly but resolvably different ages of 19-20 Ma. There is no direct link between the δD signature of meteoric fluids sourced at relatively high elevation and the K-Ar ages. We propose that low δD values from samples located within the top 450 m of the ZDZ footwall have been acquired while the shear zone was active and infiltrated by surface fluids between ca. 24 and 20 Ma. Micas may have recrystallized locally without ingress of external fluids, at different times along the 2 km long studied transect; their compositional variations [e.g. 3] may reflect changing PTAX during exhumation; closed-system recrystallization occurring after cessation of the ZDZ that may have removed incompatible Ar but not stoichiometric hydrogen. If the micas in the transect indeed record formation pressures $\geq$ 5 kbar, meteoric waters had to infiltrate as deep as 15 km. The hydrogen isotope data obtained from the ZDZ indicate that samples in the footwall interacted during high temperature deformation with meteoric fluids sourced at high elevation. These results suggest that the Zaskar region was likely lower than the Mt Everest region at ca. 17 Ma but still represented a regional topographic high.

[1] Gébelin et al, 2017, *Tectonics*, 36, doi:10.1002/2016TC004399; [2] Gébelin et al, 2020, this conference; [3] Montemagni et al, 2019, *Geological Society of London Special Publications*, 481, 127-146.



Mots-Clés : Zanskar detachment zone, ^{39}Ar - ^{40}Ar dating, deuterium δD , meteoric water influx

Modélisation de la glaciation Gaskiers, le rôle du mouvement rapide des continents à l'Ediacarien

Frédéric Fluteau¹, Boris Robert^{2*}, Guillaume Le Hir¹, Christophe Dumas³, Jean Besse¹, Marianne Greff-Lefftz¹,

¹ Institut de Physique du Globe de Paris, Université de Paris, France

² Centre for Earth Evolution and Dynamics, University of Oslo, Norway

³ LSCE - Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Gif-sur-Yvette, France

L'Ediacarien (635-541 Ma) est une période géologique clé de l'histoire de la Terre. D'importants phénomènes se produisent dans les couches superficielles de la planète tels que l'oxygénation des océans, le développement des premiers animaux, une anomalie négative majeure du $\delta^{13}\text{C}$ (événement Shuram-Wonoka) et la dernière grande glaciation du Néoprotérozoïque. Bien qu'enregistrée sur plusieurs continents, cette glaciation, appelée glaciation de Gaskiers, n'est pas considérée comme globale, contrairement aux glaciations du Marinoen (645-635 Ma) et du Sturtien (720-660 Ma). La particularité de cette glaciation tient à la distribution spatiale et temporelle des sédiments glaciaires : elle a été datée à ~580 Ma sur plusieurs cratons tropicaux mais également avant et après 580 Ma en plusieurs autres. Le but de cette étude est de mieux comprendre les raisons de cette hétérochronie des dépôts glaciaires de l'Ediacarien. La glaciation Gaskiers se produit durant une période marquée par d'importants changements paléogéographiques, potentiellement liés à de rapides mouvements de l'axe de rotation (True Polar Wander) entre 620 et 560 Ma. Cette période est également caractérisée par la formation du continent Gondwana impliquant une évolution rapide de la position des continents et le développement de grandes chaînes de montagne au cours de l'Ediacarien. Dans ce travail, nous avons étudié l'impact des changements paléogéographiques sur le climat et en particulier sur le développement des calottes de glace. A cette fin, nous avons simulé le climat à 615 Ma, 580 Ma et 565 Ma en utilisant le modèle couplé atmosphère-océan FOAM. Les sorties du modèle ont été utilisées pour forcer le modèle de glace GRISLI afin de calculer l'extension des calottes de glaces, et les comparer avec les indicateurs paléoclimatiques.

Mots-Clés : Glaciation, Ediacarien, Paléoclimat, Paléogéographie, True Polar Wander



T1.16 Géosciences marines



Morphodynamique de dunes sous-marines et flux sédimentaires associés aux échelles mensuelle à saisonnière. Cas du futur parc éolien au large de Dunkerque.

Bary Mathilde ^{1*}, Le Bot Sophie ¹, Nexer Maëlle ², Garlan Thierry ³, Blanpain Olivier ²,
Kervella Youen ², Homrani Sabrina ³, Turki Imen ¹

¹ : Normandie University, UNIROUEN, UNICAEN, CNRS, M2C, 76000 Rouen, France

² : France Energies Marines, 29280 Plouzané, France

³ : SHOM, Département Géologie Marine, 29200 Brest, France

Au sein d'un parc éolien en mer, des interactions existent entre les structures implantées (fondations d'éoliennes, câbles, portes électriques en mer, ...) et la dynamique sédimentaire des fonds qu'il est nécessaire de comprendre afin d'anticiper les impacts réciproques fond sédimentaire-structures (effet de charge, affouillement, impacts sur les voies de transit sédimentaires, ...).

Un parc éolien en mer est en projet au large de Dunkerque sur des fonds marins composés de sables fins, mobiles sous l'action des marées, vents et houles, et modelés de bancs sableux et de grandes dunes sous-marines. Dans le cadre du projet DUNES (FEM-ANR), une analyse des caractéristiques morphologiques et dynamiques des grandes dunes sous-marines présentes sur une zone de raccordement de câbles a été conduite et les flux sédimentaires associés ont été estimés.

Cette analyse a été menée au pas de 20m, sur la base de 6 MNTs bathymétriques réalisés entre novembre 2019 et janvier 2021. Les vitesses de migration mesurées sur les dunes sont comparées avec celles obtenues à l'aide d'un modèle mathématique (Turki et al., 2020) et d'un algorithme de corrélation d'image (Homrani, 2020). Les flux sédimentaires sont estimés selon la méthode de « dune tracking » (e.g. Schmitt et Mitchell, 2014) et à partir de formules empiriques du transport sédimentaire (e.g. van Rijn, 1984) sur la base de données granulométriques in situ et de résultats de modèles numériques hydrodynamiques (courant et vagues).

Les résultats permettent de préciser la variabilité morphodynamique intra- et interdunaire aux échelles mensuelle et saisonnière en relation avec les conditions de forçages hydrodynamiques (marée et houles). Des éléments sont fournis sur la fréquence temporelle adaptée pour le suivi morphodynamique des dunes et sur les impacts à attendre de la morphodynamique des dunes sur les structures du parc éolien.

Mots-Clés : dunes sous-marines, morphodynamique, variabilité intra- et interdunaire, flux sédimentaires, EMR.

*Intervenant



Grès de plage submergé dans la côte du sud du Brésil

Iran C. S. Corrêa^{*1}, Jair Weschenfelder¹, Cristiane B. Santos-Fischer¹, José C. Nunes¹

¹*Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Instituto de Geociências, UFRGS, Brésil*

La plate-forme continentale du sud du Brésil présente trois alignements de grès de plage, submergé, entre Chuí et Torres. Pour cette étude, nous avons utilisé les cartes de bord, des profils sismiques et informations sur les données de plongée. Un GPS a été utilisé pour la localisation des grès de plage. La profondeur a été obtenue par écho-sond et anéroïde de précision. Le premier grès de plage, située au sud, est formé de deux blocs, Hermenegildo Sul et Hermenegildo Norte, distants du littoral de 0,70 et 14km et avec leurs sommets à $\pm 9\text{m}$ et $\pm 13\text{m}$ des profondeurs. En suite il y a le grès de plage Fronteira Aberta, à 19km du littoral et son sommet à $\pm 13\text{m}$ de profondeur. Le suivante est formé de deux blocs, Albardão Sul et Albardão Norte, avec leurs sommets à $\pm 7\text{m}$ et $\pm 8\text{m}$ et $\pm 23\text{km}$ et $\pm 12\text{km}$ du littoral. Il est suivi par le grès de plage Capela qui se trouve à profondeur de $\pm 7\text{m}$ et à 0,50km du littoral. Le cinquième grès de plage, Minuano, est aussi divisé en sud et nord, avec leurs sommets à $\pm 19\text{m}$ et $\pm 17\text{m}$ de profondeur et à 26km et 35km du littoral. Le prochain grès de plage, appelé Carpinteiro est situé à 30km de la côte et divisé en Sud et Nord, avec leurs sommets à $\pm 14\text{m}$ et $\pm 15\text{m}$ de profondeur. Le suivant c'est le grès de plage Barra Falsa, divisé en sud et nord. Leurs sommets se trouvent entre $\pm 13\text{m}$ et $\pm 15\text{m}$ de profondeur et avec une distance de 15km et 20km du littoral. Le huitième grès de plage est également divisé en deux secteurs, Sud et Nord, avec leurs sommets à $\pm 15\text{m}$ et $\pm 13\text{m}$ de profondeur et à 0,50km et à 1 km du littoral. Le prochain grès de plage, Solidão, a son sommet à $\pm 21\text{m}$ de profondeur et se trouve à 1,5km du littoral. Le dixième grès de plage, Capão da Canoa, est divisé en Sud et Nord, avec leurs sommets à $\pm 25\text{m}$ et $\pm 27\text{m}$ de profondeur, et à 2,6km et 4km de la côte. Le dernier grès de plage, Torres, est divisé en sud et nord et leurs sommets se trouvent à $\pm 24\text{m}$ et à $\pm 20\text{m}$ de profondeur et à 1,3km et à 1,8km du littoral. En général, on peut dire que la plate-forme continentale interne du Sud du Brésil, présente trois alignements de grès de plage: le premier situé entre 7-10m, le second entre 13-19m et le dernier entre 20-30m, corroborant avec les terrasses décrites par plusieurs auteurs. Selon la courbe de variation du niveau de la mer, les grès de plages situés entre 7 et 10m de profondeur ont un âge de ± 7.100 ans AP, celles situés entre 13 et 19m ont un âge de ± 7.500 ans AP tandis que les grès de plage que se trouve dans la profondeur entre 20-30m ont un âge de ± 8.000 ans AP.

Mots-Clés : Grès de plage, plate-form continentale, Sud du Brésil

^{*}Intervenant



La zone racinaire des fumeurs noirs sur substrat ultramafique : apports d'un système fossile alpin

Rémi Coltat ^{1*}, Yannick Branquet ^{1,2}, Philippe Boulvais ¹, Pierre Gautier ¹, Ewan Pelleter ³, Gianreto Manatschal ⁴

¹ Géosciences Rennes, Université de Rennes, France

² ISTO, Université d'Orléans, France

³ IFREMER Centre de Brest, DRO/GM, France

⁴ IPGS/EOST, Université de Strasbourg, France

Les interactions fluides-roches sont des processus omniprésents en domaine océanique dans les systèmes extensifs de marges hyper-étendues et de dorsales médio-océaniques, impactant la chimie de la lithosphère et des océans. Dans ces environnements, elles incluent i) l'hydratation des roches du manteau, ii) la formation de systèmes minéralisés de haute température (e.g. sulfures massifs au plancher océanique) et iii) la carbonatation tardive des roches du manteau. Dans les environnements de dorsale lente où les processus tectoniques permettent l'exhumation des roches du manteau au plancher océanique à la faveur de détachements extensifs, des systèmes minéralisés riches en Cu, Zn, Co, Au et Ag sont associés aux roches mantelliques (i.e. sites hydrothermaux de Rainbow, Logatchev, Ashadze). Depuis leur découverte il y a 25 ans, ces systèmes minéralisés ont été intensivement étudiés permettant d'affiner notre connaissance des processus hydrothermaux associés à l'exhumation des roches du manteau. Cependant, les conditions d'accès difficiles au plancher océanique dans ces environnements couplées aux lacunes d'observation sur la dimension verticale sous ces gisements empêchent d'avoir une vision globale de ces systèmes qui repose alors plutôt sur des modèles conceptuels.

Les ophiolites préservées dans les chaînes de montagne offrent des conditions d'affleurement idéales pour observer et comprendre les altérations de l'hydrothermalisme océanique. Bien souvent, ces unités sont affectées par la déformation et le métamorphisme postérieurs qui perturbent les structures et les altérations héritées de l'histoire extensive. Dans la nappe de Platta (Alpes Suisses), vestige de l'ouverture de l'Océan Liguro-Piémontais au Jurassique, ces structures ont été remarquablement préservées du métamorphisme et de la déformation alpine. Cela en fait un chantier de choix présentant des conditions d'affleurement exceptionnelles pour étudier les processus hydrothermaux océaniques. Durant l'exhumation des roches du manteau, des fluides minéralisateurs ont circulé et permis la formation de minéralisations sulfurées. Un tel système minéralisé est préservé au site de Marmorera-Cotschen où une section de détachement océanique juxtaposant des basaltes altérés sur les serpentinites est préservée. La minéralisation riche en Cu-Fe-Co-Zn-(Ni) est encaissée dans le mur serpentinite du détachement où elle est spatialement associée à des intrusifs mafiques. De manière remarquable, la formation des sulfures (chalcopyrite, pyrrhotite, pentlandite, sphalérite) et oxydes (magnétite) s'accompagne d'un métasomatisme riche en fer et calcium dans les roches du manteau aboutissant à la formation d'ilvaïte, hydro- andradite et diopside sous forme de veines (stockwork) ou en remplacement des serpentinites. Structuralement, cet assemblage à Fe-Ca-silicates est stable dans les parties basses du système et disparaît dans les parties superficielles où la pyrite fait son apparition. Les assemblages minéralogiques enregistrés à Marmorera-Cotschen ressemblent à ceux décrits dans les systèmes océaniques actuels sur substrat ultramafique plaçant pour une origine comparable. Cependant, la présence des Fe-Ca-silicates (assemblage de haute température ; $425 \pm 75^\circ\text{C}$) et le contrôle spatial des intrusifs mafiques sur la circulation des fluides indiquent que le système de Marmorera-Cotschen correspond à une zone profonde des systèmes actuels, une zone racinaire et de réaction. L'évolution des signatures géochimiques de la minéralisation (e.g. teneur en Se, rapport Co/Ni) pouvant être reconstituée précisément sur une échelle verticale (i.e. des parties profondes vers les zones superficielles) permet ainsi de comprendre les réactions hydrothermales qui se produisent durant la circulation des fluides minéralisateurs aboutissant à la formation des fumeurs noirs sur substrat ultramafique.

Mots-Clés : VMS sur substrat ultramafique, zone racinaire, exhumation mantellique, marge hyper-étendue, fumeur noirs, dorsale médio-océanique, Platta



Regional mapping and characterisation of shallow submarine hydrothermal system (Milos)

JE Martelat^{1*}, J Escartín,² T Barreyre³, N Gracias⁴, G Vallicrosa⁴, R Garcia⁴, L Magí⁴,
P Nomikou⁵, V Puzenat⁶, P Grandjean¹, P Allemand¹, A Schouw³, S Le Moine Bauer³,
SL Jørgensen³, V Antoniou⁵, O Vlasopoulos⁵, P Polymenakou⁷, M Mandalakis⁷,
O Coskun⁸, W Orsi⁸

¹ Laboratoire de Géologie, Université de Lyon, France

² Laboratoire de Géologie, Ecole Normale Supérieure, PSL Research University, France

³ Department of Earth Science, University of Bergen, Norway

⁴ Underwater Robotics Research Center, Computer Vision and Robotics Inst., Universitat de Girona, Spain

⁵ Faculty of Geology and Geoenvironment, National and Kapodistrian University of Athens, Greece

⁶ Institut de Physique du Globe de Paris, Université de Paris, France

⁷ Institute of Marine Biology Biotechnology and Aquaculture, Hellenic Centre for Marine Research, Greece

⁸ Department of Earth and Environmental Sciences Palaeontology & Geobiology, Ludwig-Maximilians- University of Munich, Germany

Active volcanic Islands in the Eastern Mediterranean are potentially hazardous. These volcanic systems host hydrothermal activity with associated bacterial mats and hydrothermal edifices. Among the numerous known shallow water, near-shore hydrothermal systems, Milos one of the most extensive and accessible, and therefore an ideal laboratory to quantify submarine hydrothermal activity at a regional scale.

In this study we characterize the Milos hydrothermal field combining satellite imagery (WV2 images from the DigitalGlobe foundation), seafloor images from a light autonomous underwater vehicle (Sparus II University of Girona) and aerial takes from a drone. These images are correlated with field observation during dives (seafloor T°C measurements and geochemical sampling) for groundtruthing.

Satellite imagery constrains regional outflow geometry and the temporal stability of the Milos systems, that are visible owing to reflective mineral precipitates and/or bacterial mats at the seafloor, which are stable over years (Martelat et al., 2020). These outflows define a complex networks, organized locally as polygonal patterns likely associated with hydrothermal convection in porous media. Drone surveys are an affordable tool to monitor regularly the area, and document local variations at short time-scales (days to months), such as the destruction and recovery of bacterial mats (e.g., storms). While AUV mapping requires a more operation, it provides high resolution images (<1 cm resolution) over large areas. Integrating data at these different scales (Puzenat et al., 2020), we evaluate the diversity of hydrothermal seafloor features at the Milos fields (mineral precipitates, bacterial mats, bubbling pockmarks, hummocky structure), their geometry and relationships, and their evolution through time.

Martelat JE et al, 2020 Terrestrial shallow water hydrothermal outflow characterized from out of space <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106119>

Puzenat V et al, 2020 Integrated regional scale view of Milos submarine hydrothermalism <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-11612>

Mots-Clés : volcanic island, shallow water, seafloor mapping, hydrothermal activity



In Depth Imaging of the new volcano in the East of Mayotte.

Charles Masquelet^{*1}, Sylvie Leroy¹, Matthias Delescluse², Nicolas Chamot-Rooke²,
Isabelle Thinon³, Anne Lemoine³, Daniel Sauter⁴.

¹ CNRS-INSU/ ISTE-P Sorbonne Université - France

² CNRS-INSU Laboratoire de Géologie de l'École Normale Supérieure (ENS) - France

³ BRGM-Service Géologique National (BRGM) - France

⁴ IPGS/CNRS Université de Strasbourg - France

A major seismic crisis began in May 2018 and an active underwater volcano was discovered at 3400m water depth in May 2019, east of Mayotte Island. Although well recognized through multibeam mapping, the volcano has never been imaged at crustal depth until now. The relationship between this recent magmatism and deeper structures remains unknown, raising the question of the geodynamical context during the formation of the Comoros Archipelago. The nature and the age of the crust under and around the Comoros Archipelago is indeed still debated.

The SISMAORE cruise carried out onboard R/V Pourquoi Pas? in early 2021 collected a multichannel seismic dataset in order to image the volcanic zone off Mayotte.

Multichannel seismic data reveal, within the sedimentary cover, strong continuous reflectors that we interpret as a lava flow, marking the top of the volcanic edifice. This lava flow extends as far as 30 km south of the volcano within the Comoros basin. The same lava flow stretches 16 km northwards from the volcano and reaches two nearby ridges known as Les Jumelles. This layer is covered, to the South, by up to 600 meters of sediments onlapping the top of the volcanic edifice. The base of the volcanic edifice is not clearly defined, probably due to the mixing between sediments and melt products. However, we observe that the volcanic edifice sits on a ~2,5-km-thick sedimentary cover. In the crustal part, a strong acoustic basement interpreted as the top of the crust is clearly visible. At places, apparent faults delimit small basins. We notice vertical perturbations in the sediments, revealed by chaotic chimney facies, from the top of the acoustic basement to the base of the volcanic edifice. This observation suggests that the magmatism and older deep crustal structures could be locally linked.

Mots-Clés : Volcano, magmatism, sedimentary cover, deep structures, Mayotte, Comoros basin, seismic reflection.



Environmental controls of size distribution of modern planktonic foraminifera in the equatorial Indian ocean: A calibration study

Michael Adebayo ^{*1}, Thibault de Garidel-Thoron ¹, Clara Bolton ¹, Ross Marchant ²,
Franck Bassinot ³

¹ Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE) – Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, Coll. De France, INRAE – France

² School of Electrical Engineering & Robotics – Queensland University of Technology – Australia

³ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (IPSL) – CEA-CNRS-UVSQ – Université Paris-Saclay – France

Palaeoceanographic studies often rely on microfossil species abundance changes, with little consideration for species traits (e.g. size) that could be related to environmental changes. We hypothesize that whole-assemblage and species-specific planktonic foraminifera (PF) test size could be good predictors of environmental variables, and we test this using an Equatorial Indian Ocean (EIO) core-top sample set (62 viable samples). We use an automated imaging and sorting system (MiSo) to identify PF species, analyze morphology and quantify fragmentation using machine learning techniques. Machine accuracy was confirmed by comparisons with human classifiers. Data for 25 mean annual environmental parameters were extracted from modern databases and, through Exploratory Factor Analysis and regression models, we investigate the potential of PF size, at the assemblage and species level, for reconstructing oceanographic parameters in the Indian Ocean. Within our tropical dataset, we find that SST is not a significant driver of assemblage size, although thermocline-dwelling species *Globorotalia inflata* and *Globorotalia truncatulinoides* show a significant relationship with temperature. Our analyses indicate that deep carbonate ion concentration and core depth may be important factors influencing PF size, especially in species that are large-sized or bear calcite crusts such as *Globigerinoides conglobatus*, *Globorotalia menardii*, and *Neogloboquadrina dutertrei*. We propose that PF population size could potentially be useful to reconstruct bottom water carbonate concentrations and sea surface temperature. This approach will be tested on a new downcore record from the Arabian sea (ODP Site 722) during key Pleistocene glacial-interglacial transitions, where existing sea surface temperature and other paleo-reconstructions will allow meaningful comparisons.

Mots-Clés : Automated foraminiferal analysis, planktonic foraminifera, equatorial Indian ocean, Holocene, paleoceanographic reconstructions



Study of the Pleistocene submarine canyons of the south-eastern Niger delta basin: Tectonostratigraphic evolution and infilling

Vivian Oguadinma ^{2, 1, ,} Massimo Dall'asta ^{2, ,} Vincent Delhaye-Prat ^{2, ,}
Scott Thackrey ^{2, ,} Jean-Yves Reynaud ^{1,}

² : TOTAL E & P, Africa - HUB CSTJF, Avenue Larribau, Pau, France
TOTAL, CSTJF, Pau

¹ : Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, Lille, France University of Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq

Using integrated analysis of 3D seismic data and well logs, this study evaluates the tectonosedimentary evolution of Pleistocene submarine canyon systems of the Eastern Niger Delta basin and discusses the controlling factors on canyons formation and development. The study focuses on the head and trunk of a two-branched, long-lived canyon system, the Galabor Canyon. These branches are the eastern and western branches and are separated by a shale ridge that formed contemporaneously to the canyons. The canyon head encroaches the shelf edge, where incised valleys and shelf-edge deltas are localized. The western branch is 3km and 6km wide on the canyon neck and trunk, respectively, and 7km wide at a confluence point where it connects with the eastern branch of the canyon system. The eastern branch contains a 2.5km wide channel belt that displays high amplitude contrast. Such channel belts evolve through lateral accretion of individual channels about 400m wide, increasing sinuosity from straight to meander shapes. Seismic horizons correlating to the top and bottom of the canyon fills were mapped across a regional 3-D seismic volume. They correlate to shelf-margin systems tracts, the stacking pattern of which suggests possible fourth-order sequences. Growth faults dissect shelf-edge deltas, which are correlated to mass-transport deposits in the canyon-head infilling. Mass transport complexes are also observed away from the shelf edge, where the rising shale ridge laterally feeds the canyon. River connection during lowstand stages of canyon activity is suggested by large amounts of sand forming multistorey meander belts confined within the canyon and laterally passing to muddy levees and fallout turbidites. Two stages of canyon incision and infilling are stacked in the Pleistocene. The primary incision that resulted in canyon formation is tied to Marine isotope stage (MIS) 52 at about 1.65Ma during a major regressive event. The second canyon system cut into the first system after a short period of deposition of hemipelagic sediments. The cross-sectional geometry of these canyons is V-shaped on the canyon neck but gradually passes downslope to a U-shape geometry as the canyons widen. However, both canyon geometry reverses into a V-shaped form just as they come close to the downstream confluence point, suggesting an influence of shale ridge uplift on the sudden change in geometry. The data presented in this study provides clues for studying the relationships between submarine canyon heads and sediment sources and the structural controls in the routing of sediments from the shelf environments to the deep basins.





Évolution structurale du détroit du Passage du Vent à la frontière nord de la plaque Caraïbe : polyphasage et migration de la déformation

Alana Oliveira de Sá ^{*1}, Elia D'Acremont ¹, Sylvie Leroy ¹, Sara Lafuerza ¹

¹ Sorbonne Université, CNRS-INSU, Institut des Sciences de la Terre Paris, IStEP, 75005 Paris, France

La frontière Nord de la plaque Caraïbe est caractérisée par une collision oblique entre les plaques tectoniques Caraïbe et Amérique du Nord. Le Système de Failles décrochantes Septentrional-Orientale (SOFZ) qui représente la limite coulissante entre ces deux plaques majeures, accommode une grande partie de l'obliquité de la convergence. Depuis sa mise en place à la fin de l'Oligocène, cette limite de plaques a migré au cours du temps. Le détroit du Passage du Vent, entre le sud-est de Cuba et le nord-ouest d'Haïti, est traversé actuellement par la SOFZ, il représente un point critique pour la compréhension de l'évolution de la frontière de plaque nord Caraïbe. Caractérisé par un bassin s'étendant sur 120 km de long, le Bassin du Passage du Vent est limité au nord par un plateau correspondant à la ride de la Tortue. Ce détroit présente une morpho-structure héritée de l'évolution polyphasée de la SOFZ.

L'analyse des données bathymétriques et de sismique réflexion acquises au cours des campagnes océanographiques HAITI-SIS1 et 2 (2012-2013), suggère que la couverture sédimentaire de la région du détroit du Passage du Vent a enregistré au moins deux épisodes de déformation. L'ouverture du Bassin du Passage du Vent s'initie pendant une phase transtensive datée de la fin de l'Oligocène relative au début de la mise en place de la SOFZ. Cette phase transtensive est suivie par une deuxième phase de déformation associée à un épisode transpressif comme le prouvent les séries sédimentaires plissées du bassin. L'analyse des lignes sismiques permet de révéler que les séries synsédimentaires du bassin sont décalées ~80 km par le coulissage senestre des segments de la SOFZ. Cela permet de dater la mise en place de la SOFZ dans la région du Passage du Vent à ~5,2 Ma. Ce résultat renforce l'hypothèse que la frontière Nord Caraïbe a migré progressivement du nord au sud par sauts successifs au cours de son évolution, jusqu'à initier son tracé actuel à travers le détroit du Passage du Vent.

Mots-Clés : Frontière Nord Caraïbe, décrochement, transtension, transpression, bassin, évolution polyphasée



Intricate oceanic plate boundaries revealed in the first World Seafloor Map

Benjamin Sautter, Javier Escartin ², Sven Petersen ³, Carmen Gaina ⁴,
Manuel Pubellier^{1,2}

¹ CGMW, 77 rue Claude Bernard, 75005 Paris

² Laboratoire de Géologie – CNRS, UMR 8538, École Normale Supérieure, PSL University, Paris, France

³ GEOMAR – Helmholtz Centre for Ocean Research, Kiel, Germany

⁴ Centre for Earth Evolution and Dynamics (CEED), University of Oslo, Sem Sælands vei 24, PO Box 1048, Blindern, NO-0316 Oslo, Norway

The detailed configuration of divergent oceanic plate boundaries records information on the processes that interact along these plate boundaries, such as the different regimes of seafloor and oceanic lithosphere formation. In spite of being one of the Earth's major tectonic features, the geometry of mid-ocean ridges at high resolution (~10 km), its segmentation by non-transform offsets vs transform faults, is not yet available at global scale. Existing plate boundary compilations are provided at coarser resolutions (e.g., Bird, 2003), usually suitable only for plate-scale studies.

With the increasing extent of high-resolution bathymetry data publicly accessible in addition to a growing body of literature, it is now possible to map in detail the geometry of divergent plate boundaries, and their segmentation, along a significant proportion of the mid-ocean ridge system. While <20% of the seafloor has been mapped with multibeam shipboard systems, the ridge axis is relatively well-surveyed owing to research focused on ridge processes during the last few decades.

Through the World 5M project of the DDE Geological Mapping group, supervised by CGMW and CAGS, we publish the first World Seafloor Map at scale 1:5M. In this map, where we report seafloor structures and include up-to-date datasets of oceanic features, we have compiled a detailed cartography of the mid ocean ridge geometries, including individual ridge segments, globally. We also performed the digitization of all fracture zones, which localize strike-slip deformation along well-defined transform plate boundaries linking ridge segments that are laterally offset. In this new digital dataset, we have also identified several segments that are not offset by transform faults, and which define zones of diffuse deformation accommodated through heterogeneous and complex transfer zones with no localized deformation. Our high-resolution map reveals the variability in the nature and distribution of both ridge segmentation and types of ridge offsets, and their possible dependence on spreading rate. This mid-ocean ridge system digitization is based on the compiled shipboard bathymetry GMRT v3.9 (Ryan et al., 2009), available through www.gmrt.org and existing published literature. The map also includes other available datasets, such as seafloor magnetic anomalies, age of the oceanic crust, hydrothermal vents, IODP drill sites, sediment thickness, hot spots and large igneous provinces.

The World Seafloor Map is built in a GIS environment, and all features are associated with specific metadata (attributes). All the digital data and associated data sources will be made available upon validation and verification to encourage contributions to improve, update, and correct the existing datasets.

Mots-Clés : World Seafloor Map, Plate Boundaries, Mid-Ocean Ridge, Fracture Zone, Database



T1.17 Différentiation de la lithosphère



Déstabilisation de la lithosphère et convection à petite échelle : contraintes géophysiques et expériences de laboratoire

Claudia Adam ¹, Valérie Vidal ^{*2}, Bimal Pandit ¹, Anne Davaille ³, Pamela Kempton ¹

¹ Geology Department – Kansas State University of Agriculture and Applied Science – USA ² Laboratoire de Physique, CNRS UMR 5672 – Ecole Normale Supérieure de Lyon – France ³ Laboratoire FAST, Université d'Orsay – France

La déstabilisation de la lithosphère océanique par la convection petite échelle à sa base est un phénomène important dans le cadre d'une compréhension globale du couplage manteau/lithosphère. Nous avons caractérisé la base de la lithosphère océanique dans l'océan Pacifique à l'aide de trois modèles tomographiques haute résolution. Les régions présentant une lithosphère anormalement épaisse sont associées à un plancher océanique plus vieux que 100 Ma et sont allongées selon la direction actuelle du mouvement de la plaque Pacifique. Elles sont corrélées avec des dépressions bathymétriques et des anomalies négatives dugéoïde (degrés 10-19 et 14-39), qui peuvent être expliquées par la topographie dynamique. Aucune corrélation n'est observée avec le volcanisme.

Nous interprétons ces régions de lithosphère épaissie comme la localisation d'instabilités, où la lithosphère plus dense se détache et plonge dans le manteau sous-jacent. Afin de mieux comprendre le phénomène à l'origine de ces instabilités, nous avons réalisé des expériences de laboratoire. Différents fluides de viscosité et densité variables sont soumis à un chauffage latéral afin de générer une convection à grande échelle dans la cellule expérimentale. Ils sont simultanément refroidis par le dessus. Cette configuration engendre la formation de convection à petite échelle à la base de la couche limite thermique froide supérieure. Les résultats expérimentaux montrent l'existence de deux structures différentes : (1) des instabilités s'organisant en rouleaux longitudinaux, alignés dans la direction de l'écoulement à grande échelle ; (2) des panaches 3D, non stationnaires, qui plongent depuis la base de la lithosphère et sont cisailés par l'écoulement à grande échelle. La morphologie des panaches 3D est similaire à ce que l'on observe dans les modèles de tomographie. Ces expériences permettent de mieux comprendre la phénoménologie à l'origine des instabilités lithosphériques observées dans les données géophysiques.

Mots-Clés : Lithosphère océanique, instabilités, convection petite échelle



Petrology of Fe-Ti-rich rodingites from Western Carpathians

Juraj Butek ^{*1,2}, Stéphanie Duchene ¹, Michel Grégoire ¹, Ján Spišiak ²

¹ Géosciences Environnement Toulouse (GET), Université de Toulouse, UPS, CNRS, IRD, CNES – France

² Faculty of Natural Sciences, Matej Bel University – Slovakia

Rodingite represents a relatively uncommon metasomatic rock type occurring as dykes or lenses in association with serpentinized ultramafic rocks and typically consist of Ca-rich oftenhydrated silicate minerals. Rodingites have recently been recognized as a source of information on fluid compositions and their circulation in both ocean floor and subduction zones. Yet, the nature of the protoliths, the origin of fluids, the details of fluid-rock interaction and the metamorphic context remain often obscure. Here, we address some of these questions in the case of rodingites from Western Carpathians.

Rodingites are associated in the field with dismembered serpentinized bodies of ultramafic rocks, Mesozoic in age, overlying Carboniferous metasediments. They mostly consist of vesuvianite, diopside and hydrated garnet with minor titanite, chlorite, epidote, calcite and Fe-Ti oxides. The latter represent the oldest mineral phase, followed by diopside, vesuvianite and garnet. The latest hydrothermal alteration is outlined by the formation of a well equilibrated epidote-chlorite-calcite association. Vesuvianite clearly forms several generations including some monomineral veins. Whole rock analyses allow to identify two groups of rodingites: 1) Fe-Ti-rich rodingites dominated by garnet, titanite, ilmenite and rutile; 2) Fe-Ti poor rodingites dominated by vesuvianite and diopside. Trace elements content indicates a significant enrichment compared to chondrite and commonly a strong positive Eu anomaly.

The high modal amount of vesuvianite and the immobility of Al during metasomatic events suggest that the protolith was relatively Al-rich. Taking into account the REE patterns of whole-rock and minerals, the high TiO₂ content (up to 9.2 wt.%) and the local Fe-Ti-rich accumulations, we suggest that the protoliths were more or less Fe-Ti-rich gabbroic rocks. First thermodynamic modeling suggests an important control of the CO₂ and the *f*O₂ of the metasomatic fluid(s) on the rodingite paragenesis.

Mots-Clés : rodingite, mineralogy, geochemistry, vesuvianite, Western Carpathians



Interactions entre magma et roches sédimentaires encaissantes : une revue de leurs implications dans les processus magmatiques

Giada Iacono-Marziano*

Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, CNRS/Université d'Orléans/BRGM, France

Les interactions à haute température entre magma et roches sédimentaires encaissantes, communément appelées assimilation, peuvent avoir des conséquences notables pour les processus magmatiques. La nature des roches sédimentaires contrôle l'intrusion des magmas dans les bassins sédimentaires, en jouant un rôle dans la formation et propagation des structures de type sill. Quand le volume de magma est élevé, comme dans le cas des grandes provinces magmatiques, son intrusion dans des roches sédimentaires riches en composants volatils provoque la libération de quantités importantes de gaz, avec de multiples conséquences environnementales (ex. effet de serre, extinctions de masse). A l'échelle d'un volcan, les volatils produits par l'interaction du magma avec des roches sédimentaires peuvent augmenter significativement le dégazage et modifier le style éruptif.

L'assimilation de roches sédimentaires peut aussi modifier la composition du magma, ses équilibres de phases et ses conditions d'oxydoréduction, affectant alors les processus métallogéniques. La modification de l'état d'oxydoréduction d'un magma a, par exemple, été observée favoriser la ségrégation/cristallisation de phases magmatiques qui sont généralement peu communes ou accessoires (comme le fer métal, le liquide sulfuré ou les oxydes), en conduisant parfois à la formation de gisements de classe mondiale. Je présenterai une revue des mécanismes d'assimilation des roches carbonatées, évaporitiques et carbonacées, et des processus magmatiques directement impactés par ces interactions, en utilisant des cas d'études qui illustrent chaque mécanisme.

Mots-Clés : Interactions, magma, roches sédimentaires, volatils, processus magmatiques.



Archean subduction relics in the cratonic root – evidence from eclogite xenoliths

Bertrand N. Moine*¹, I. Bogdana Radu ², Chris Harris ³, Ivan Vlastelic ⁴,
Nathalie Bolfan- Casanova ⁴, Dmitri Ionov ⁵, Andrey Korsakov ⁶,
Alexander Golovin ⁶, E. Deloule ⁷, Gabi Costin ⁸

¹ Université de Lyon, UJM, Laboratoire Magmas et Volcans, UCA-CNRS-IRD, Saint-Etienne, France

² Swedish Museum of Natural History, Stockholm, Suède

³ Department of Geological Sciences, University of Cape Town, South-

Africa ⁴ Laboratoire Magmas et Volcans, UCA-CNRS-IRD, Clermont-Ferrand, France ⁵ Geosciences Montpellier CNRS, Université de Montpellier, France

⁶ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Russian Federation

⁷ CRPG, UMR7358, CNRS, Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy, France

⁸ Department of Earth, Environmental and Planetary Sciences, Rice University, Houston, USA

Les xénolites d'éclogites remontées par les éruptions kimberlitiques au sein des cratons sont un excellent moyen d'étudier la formation et l'évolution des racines cratoniques archéennes. Ces roches sont des produits magmatiques d'affinité basaltique équilibrés à haute pression (3-7 GPa) et représentent soit des cumulats profonds soit des roches tectoniquement enfouies. Ces roches ont généralement une histoire très complexe car elles ont séjourné extrêmement longtemps dans le manteau sous-cratonique. Les âges isochrones Os donnent respectivement 2.95 et 2.9 Ga pour le craton Kaapvaal et le craton Sibérien. Ces roches ont pu subir la fusion et sont proposées comme résidus complémentaires des TTG. Par ailleurs, ces roches ont potentiellement été modifiées par des interactions métasomatiques avec les magmas kimberlitiques ou pré-kimberlitiques. Les analyses des isotopes de l'oxygène montrent que leur composition peut-être extrêmement variable et sont interprétées comme une évidence d'interaction entre ces roches basaltiques anciennes et des eaux superficielles à hautes et basses températures. Cependant parmi les échantillons décrit jusqu'à ce jour, peu d'échantillons montrent indubitablement que ces éclogites correspondent à de la croûte océanique archéenne ou paléo-protérozoïque subductée et préservée. Ici nous présenterons les résultats obtenus sur une très large collection (plus de 600 échantillons) des cratons Kaapvaal et Sibérien. Les caractéristiques pétrographiques et géochimiques ont permis de déterminer que moins de 5% des échantillons ont préservés leurs caractéristiques primaires et sont potentiellement des fragments de croûte océanique archéenne altérée par l'eau de mer. Pour mettre en évidence de manière indubitable cette caractéristique, nous avons mesuré les isotopes stables de l'O, de l'H et du Li. Ces trois systèmes isotopiques sont fortement réactifs aux interactions avec l'eau de mer à haute et basse température et particulièrement discriminants.

Mots-Clés : éclogite, xénolites, craton, subduction, archéen, interaction eau-roche



T2.1. Approche interdisciplinaire du manteau



Investigating the role of mantle composite rheology on the generation of plate-like tectonics in whole-mantle convection models

Maëlis Arnould^{*1}, Tobias Rolf^{2,3}, Antonio Manjón-Cabeza Córdoba²

¹Laboratoire de Géologie de Lyon (LGL-TPE), Université Lyon 1 Claude Bernard, ENS de Lyon, CNRS UMR 5276 - France

²Centre for Earth Evolution and Dynamics (CEED), University of Oslo – Norway

³Institute of Geophysics, University of Munster - Germany

Earth's lithospheric behavior is tied to the properties and dynamics of mantle flow. In particular, upper mantle rheology controls the coupling between the lithosphere and the asthenosphere, and therefore partly dictates Earth's tectonic behavior. It is thus important to gain insight into how Earth's upper mantle deforms in order to understand the evolution of plate tectonics. The presence of seismic anisotropy in the uppermost mantle suggests the existence of mineral lattice-preferred orientation (LPO) caused by the asthenospheric flow. Together with laboratory experiments of mantle rock deformation, this indicates that Earth's uppermost mantle can deform in a non-Newtonian way, through dislocation creep. Although such a deformation mechanism can significantly impact both mantle flow and the surface tectonic behavior, most numerical studies of whole-mantle convection use a viscoplastic rheology involving diffusion creep as the only deformation mechanism in the mantle.

Here, we investigate the effects of using a composite rheology (with both diffusion and dislocation creep) on the surface tectonic behavior in 2D-cartesian whole-mantle convection models that self-consistently generate plate-like tectonics. We vary the proportion of dislocation creep in the mantle by imposing different temperature- and depth-dependent transitional stresses between diffusion and dislocation creep. Using different yield stresses, we investigate how the amount of dislocation creep affects the planform of convection and promotes surface plate-like or stagnant-lid behavior. In particular, we show that for low yield stresses promoting plate-like behavior in diffusion-creep-only models, modeling a composite rheology in the mantle favors more surface mobility while for large yield stresses which still generate plate-like motions in diffusion-creep-only models, a progressive increase in the amount of dislocation creep leads to stagnant-lid convection. We discuss the spatio-temporal distribution of dislocation creep in the mantle in light of the observed geometry of slabs and plumes and the spatial distribution of seismic anisotropy in Earth's upper-mantle.

Mots-Clés : Composite rheology, plate tectonics, mantle convection



Using thermo-mechanical models of subduction to constrain effective mantle viscosity

Fanny Garel ^{1*}, Catherine Thoraval ¹, Andréa Tommasi ¹, Sylvie Demouchy ¹,
D. Rhodri Davies ²

¹ Géosciences Montpellier, Université de Montpellier & CNRS, Montpellier,
France ² Research School of Earth Sciences, ANU, Canberra, Australia

Mantle convection and plate dynamics transfer and deform solid material on scales of hundreds to thousands of km. However, viscoplastic deformation of rocks arises from motion of defects at sub-crystal scale, such as vacancies or dislocations. In this study, results from numerical experiments of dislocation dynamics in olivine for temperatures and stresses relevant for both lithospheric and asthenospheric mantle (800–1700 K and 50–500 MPa; Gouriet et al., 2019) are used to derive three sigmoid parameterizations (*erf*, *tanh*, *algebraic*), which express stress evolution as a function of temperature and strain rate. The three parameterizations fit well the results of dislocation dynamics models and may be easily incorporated into geodynamical models. Here, they are used in an upper mantle thermo-mechanical model of subduction, in association with diffusion creep and pseudo-brittle flow laws. Simulations using different dislocation creep parameterizations exhibit distinct dynamics, which could not have been predicted a priori but arise from feedbacks between slabsinking velocity, temperature, drag, and buoyancy, which are controlled by the strain rate dependence of the effective asthenosphere viscosity. Comparison of model predictions to geophysical observations shows that the *tanh* parameterization best fits both crystal-scale and Earth-scale constraints. Deriving mantle rheology cannot therefore rely solely on the extrapolation of semi-empirical flow laws. The present study shows that thermo-mechanical models of plate and mantle dynamics can be used to constrain the effective rheology of Earth's mantle in the presence of multiple deformation mechanisms.

Mots-Clés : olivine, dislocation creep, subduction dynamics, mantle viscosity, rheology parameterization



Lithosphere-asthenosphere transition tracked in models of plate and mantle dynamics: the “constant-velocity plate” deforms at its base

Fanny Garel ^{1*}, Catherine Thoraval ¹

¹ Géosciences Montpellier, Université de Montpellier & CNRS, Montpellier, France

If the lateral limits of tectonic plates are well mapped by seismicity, the bottom boundary of the uppermost rigid layer of the Earth, comprising both crust and shallow mantle, remain elusive. A lithospheric plate can be viewed as a cold, rigid, undeformed and/or translating block, which relates to different physical fields, i.e. temperature, viscosity, strain rate and velocity. Their variation with depth are here investigated in thermo-mechanical models, either in a transient subduction or in a steady-state plate-driven set-up, with mantle rheology derived olivine plastic creeps. We propose three different definitions of lithosphere- asthenosphere boundaries (LAB), associated to either temperature (1300 K), strain rate (10- 16 s⁻¹). or horizontal velocity (0.5% departure from surface velocity). The depths of these 3 LABs are distinct from one another and the base of the “constant-velocity” plate deforms in continuity with the underlying asthenosphere mantle. If the thermal structure has a major control on the three LABs, the surface plate velocity, the asthenosphere flow geometry and magnitude also influence the velocity- and strain rate-defined LABs. The thickening of the “constant-velocity” plate with increasing surface velocity is interpreted as a thicker mantle layer dragged by a larger surface plate motion. The mechanical transition from lithosphere to asthenosphere also adjusts to mantle dynamics, and this transient behaviour has implications for mass transport within the Earth's mantle. We discuss how various set of data may constrain, or not, thermo-mechanical mantle fields, given that most of the observables (e.g. seismic velocities or anisotropy) suffer from temporal integration and/or spatial averaging. We conclude that the “constant-velocity plate” is the most relevant definition for the lithosphere when addressing mantle mass transfers, even if it is the least likely to be constrained by geophysical data.

Mots-Clés : thermo-mechanical models ; plate-driven mantle flow ; lithosphere-asthenosphere transition ; constant-velocity plate



Tomographie 4D à haute vitesse sous conditions extrêmes : application à la migration des magmas carbonatés dans le manteau terrestre

Elena Giovenco^{*1}, Jean-Philippe Perrillat¹, Eglantine Boulard², Yann Le Godec², Andrew King³, Nicolas Guignot³, Jean-Pierre Deslandes³, Jean-Paul Itié³

¹Laboratoire de Géologie de Lyon : Terre, Planètes et Environnement - France ²Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie - France ³Synchrotron SOLEIL - France

Connaitre la localisation et les modalités de transport des magmas dans le manteau terrestre est une étape cruciale pour la compréhension des processus géochimiques et géodynamiques profonds. Dans ce projet, nous étudions la cinétique et la géométrie de migration d'un liquide carbonaté au travers d'un agrégat polycristallin d'olivine grâce à des expériences couplant la nouvelle presse UToPEC (Ultra-fast Tomography Paris-Edinburgh Cell) au faisceau de rayons X de la ligne de lumière PSICHE du synchrotron SOLEIL.

Ce dispositif permet l'acquisition d'une reconstruction tomographique 3D complète (900 radiographies sur 180 ° de rotation) de résolution micrométrique en un temps de l'ordre de la seconde tout à fait adapté au suivi de systèmes dynamiques. Dans nos expériences, les échantillons sont comprimés à 2 GPa puis chauffés entre 800 et 1050°C afin d'atteindre le point de fusion du carbonate, puis des séries temporelles de tomographies sont enregistrées pour suivre *in situ* la migration du liquide.

Nous présenterons le processus de segmentation puis de quantification des images 3D qui permettent le suivi, tomographie après tomographie, de l'état global du réseau d'écoulement mais aussi l'évolution des propriétés morphologiques (*e.g.* élongation, volume, orientation) de chaque poche de liquide sélectionnée.

Cette nouvelle approche *in situ* a permis la mise en évidence de phénomènes d'imprégnation rapide de l'encaissant par le carbonate ainsi que la densification progressive du réseau de percolation au cours du temps.

Mots-Clés : Tomographie 4D, HP-HT, magma carbonaté



L'origine et évolution du manteau du craton Sibérien de l'Archéen au Paléoprotérozoïque

Dmitri Ionov

Géosciences Montpellier UMR , Université de Montpellier, 34095 Montpellier, France

Les cratons, les parties les plus anciennes des continents, constituent ~40% de la croûte continentale. Leur stabilité et leur longévité sont dues à la présence protectrice de très épaisses « racines » du manteau lithosphérique (jusqu'à 250 km) constituées de péridotites réfractaires formées par la fusion partielle avancée.

On a présumé que les racines cratoniques sont toujours très anciennes, >2,5 Ga, i.e. Archéennes, mais les études des enclaves du manteau dans des roches volcaniques du craton Sibérien suggèrent une autre hypothèse. Le manteau du craton Sibérien a une grande complexité pétrographique, chimique et isotopique, avec d'importantes variations régionales.

Les plus anciennes roches de la partie centrale du craton (kimberlite Udachnaya) sont de très rares dunites (2.5-3.3 Ga), dont certains composés de très grands grains d'olivine (>1 cm).

Par contre, le type principal de péridotites parmi les xénolites d'Udachnaya (harzburgites grenues) est plus jeune : 1,9-2,1 Ga. Les enclaves de péridotites provenant de nord-est du craton (kimberlite Obnazhennaya) ont des âges similaires (1,8-2,9 Ga), sans distinction entre harzburgites et dunites, et sont souvent enrichies en pyroxènes et en éléments incompatibles issus de différents magmas, silicatés ou carbonatés. Conclusion, les racines du craton ont été formées en plusieurs étapes et par différents processus.

La croûte profonde du craton présente des clusters d'âges similaires au manteau : 1,8 à ≥3,2 Ga. Les plus anciennes roches, dans la croûte ou dans le manteau, sont les plus rares. Probablement, les roches initiales du craton ont été détruites ou modifiées par des événements plus récents. Le manteau cratonique n'est donc pas aussi stable et solide qu'on le pensait. Il a subi périodiquement d'importantes transformations lors des étapes majeures de la tectonique globale. La plupart des cratons sont probablement des agglomérations formées entre 3,8 Ga et 1,8 Ga, jusqu'au Paléo-protérozoïque plutôt qu'à l'Archéen.

Mots-Clés : craton ; manteau lithosphérique ; péridotite ; isotopie Re-Os ;



Signature sismique de la discontinuité à 410 km : une approche expérimentale

Jean-Philippe Perrillat ^{*1}, Benoît Tauzin^{1, 2}, Julien Chantel³, Julie Jonfal¹,
Isabelle Daniel¹, Zhicheng Jing^{4,5}, Yanbin Wang⁴

¹Laboratoire de Géologie de Lyon : Terre, Planètes et Environnement, Univ. Lyon – France

²Research School of Earth Sciences, ANU Canberra -

Australia³Unité Matériaux et Transformations, Univ.

Lille - France ⁴Center for Advanced Radiation Sources,

Univ. Chicago - USA

⁵Department of Earth and Space Sciences, Southern Univ. of Science and Technology - China

Les changements de phase de l'olivine $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ vers ses polymorphes de haute pression, wadsleyite et ringwoodite, sont depuis longtemps associés aux discontinuités sismiques observées à 410 et 520 km de profondeur dans le manteau terrestre. La position et l'épaisseur de ces discontinuités fournissent des contraintes sur la température, la composition chimique et la teneur en eau du manteau terrestre. Toutefois, il existe encore des divergences entre les observations sismiques et expérimentales. Parmi celles-ci, la faible épaisseur de la discontinuité à 410 km déduite de la réflectivité des ondes sismiques est difficile à concilier avec la nature progressive de la transformation de l'olivine en wadsleyite prédite par les équilibres de phases.

Dans cette étude, nous avons exploré expérimentalement la contribution de la cinétique de transition de phase à l'épaisseur de la discontinuité. Pour ce faire, des mesures de diffraction des rayons X *in situ* sont associées à l'interférométrie ultrasons afin de suivre les vitesses des ondes élastiques au cours de l'avancement de la réaction. Les expériences ont été réalisées sur la presse multi-enclumes de 1000 t de la ligne de lumière ID-13D du synchrotron APS (Chicago, USA). Les échantillons, des agrégats polycristallins d'olivine de composition $X_{\text{Fe}} = 0,10$ et $X_{\text{Fe}} = 0,52$, ont été portés dans le domaine de stabilité de la wadsleyite (ou de la ringwoodite) entre 7-12 GPa et 1000-1200 K. Les mesures montrent une diminution inattendue de la vitesse des ondes de cisaillement au début de la réaction, suivie d'une augmentation régulière qui est en corrélation avec le pourcentage de transformation. Cette anomalie de vitesse est couplée à une augmentation de l'atténuation observée à partir des amplitudes des échos des ondes S. Nous interprétons cet affaiblissement au stade précède la transformation comme le résultat de la présence d'une phase intermédiaire métastable observée en diffraction X.

Dans le manteau terrestre, ce mécanisme de transformation affecterait le gradient élastique à l'intérieur de la loupe biphasée olivine-wadsleyite à 410 km; expliquant ainsi la faible épaisseur et la forte réflectivité la discontinuité.

Mots-Clés : Olivine, Wadsleyite, Ringwoodite, Expérimentation haute-pression, Ultrasons, Synchrotron

Où se trouvent les volatils manquants ? - Le manteau inférieur terrestre comme possible réservoir

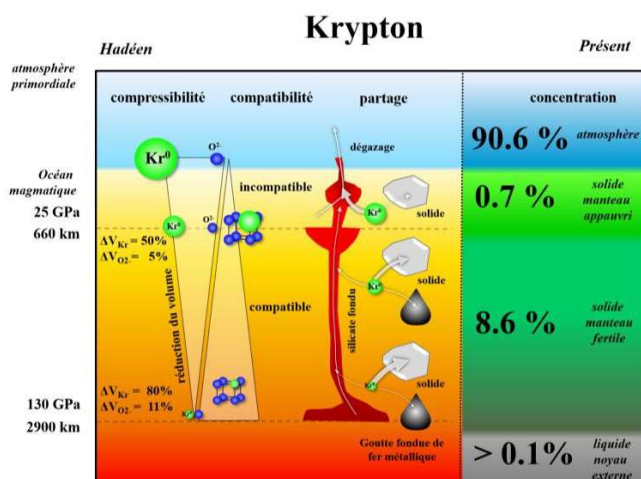
Angelika Dorothea Rosa^{*1}, Mohamed Ali Bouhifd², Guillaume Morard³

¹ European Synchrotron Radiation Facility- ESRF, 38000 Grenoble- France

² Laboratoire Magmas et Volcans, Université Clermont Auvergne, CNRS, IRD, OPGC, F-63000 Clermont-Ferrand, France

³ Institut des Sciences de la Terre (ISTerre), Université Grenoble Alpes, CNRS, 38000 Grenoble, France

D'après les calculs des équilibres géochimiques, une grande quantité de volatils incluant les gaz rares n'aurait pas été dégazée lors de l'accrétion terrestre. Ces volatils seraient stockés dans des réservoirs profonds tels que le manteau inférieur, la couche D" ou bien le noyau terrestre. En raison du manque de données expérimentales, en particulier des coefficients de partage entre phases solides et liquides des éléments volatils, l'existence même de ces réservoirs reste fortement débattue. Notre étude récente a montré que les minéraux du manteau inférieur terrestre possèdent une capacité de stockage en gaz rares (argon, krypton et xénon) compatible avec les données géochimiques (Rosa et al., EPSL, 2020). Pour aboutir à ce résultat, nous avons effectué des expériences de solubilité aux conditions extrêmes de pression et température correspondant à la frontière noyau – manteau (>3000 K, 115 GPa). Ces travaux ont permis d'établir que le stockage de volatils dans le noyau terrestre est peu probable. Ils ont également permis de proposer un scénario d'intégration des volatils lors de la phase de solidification de la Terre. Cette étude a des implications sur l'évolution géochimique et géodynamique de la Terre et fournit des informations importantes sur le budget global en volatils de notre planète.



Graphique illustrant le comportement physico-chimique du krypton pendant le refroidissement de l'océan magmatique lors de l'Hadéen (compressibilité, compatibilité et comportement de partage). Les différentes propriétés de partage du Kr peuvent expliquer ses concentrations actuelles dans différents réservoirs de la Terre estimées à partir des calculs de bilan de masse géochimique (à droite).

Mots-Clés: gaz rares, accrétion terrestre, réservoirs profonds, le manteau inférieur, coefficients de partage



NoLiMit: Software and Catalogs of Seismic Waveforms for Petro-Physical Analyses of the Earth's Mantle Transition Zone

Benoit Tauzin^{*,1,2}, Lauren Waszek^{3,2}, Juan Carlos Afonso⁴, Malcolm Sambridge²,
HrvojeTkalcic², Thomas Bodin¹, Eric Debayle¹

Affiliation : 1 Laboratoire de Géologie de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, France. 2 Research School of Earth Sciences, Australian National University, Australia. 3 NMSU Geological Sciences, New Mexico State University, USA. 4 Department of Earth and Environmental Sciences, Macquarie University, Australia.

This work aims at providing to the community new databases, procedures, models, and software packages for the analysis of the elastic, thermal and petrological properties of the Earth's mantle transition zone (MTZ). To better account for the multiple spatial scales in the thermo-chemical structure and imperfect seismic data in terms of coverage and noise, we developed software modules relying on the partition of the Earth in Voronoi cells, with an optimization algorithm searching to minimize the effect of noise in the data. We use a self-consistent thermodynamical approach to predict the theoretical seismic response from various mineralogical phase assemblages. These modeling efforts lead to the construction of catalogs of synthetic seismic waveforms for SS-, PP-precursors, receiver functions, and ScS reverberations data, for direct comparison with observed seismic data. We illustrate the use of these catalogs and software in a two-case analysis. At a regional scale, we show that the complexity of the MTZ in the subduction zones of North and Central Honshu below the Japan (East) Sea --- single and double discontinuities ranging in depth from 650 to 730 km, as well as a low-velocity zone at the tip of the subducted Pacific plate --- can theoretically be explained by phase equilibria in a pyrolitic mantle composition. At a global scale, we combine PP-, SS-precursors observations and mineral physics modeling, and we demonstrate that imperfect chemical equilibration of a mantle with pyrolitic composition is able to explain the global absence of P-wave reflections underneath the 660-km discontinuity.

Mots-Clés : Transition zone ; Mineral physics ; Seismology ; Geodynamics



T2.2. Approche interdisciplinaire du noyau



Dynamos with anisotropic conductivity

Thierry Alboussière^{1*}, Franck Plunian² and Marc Moulin³

¹Laboratoire de Géologie de Lyon LGL-TPE, France

²Institut des Sciences de la Terre, ISTerre, Grenoble,

France³Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon, France

The magnetic field of the Earth and other planets, of the Sun and other stars, is thought to be generated and maintained by dynamo action. Cowling's theorems have played an important role in identifying impossible cases for dynamo action: two-dimensional flows of an electrically conducting fluid cannot generate a magnetic field, an axisymmetric magnetic field cannot be generated by a dynamo process... Hence, when theoretical or experimental dynamo models have been obtained, they were necessarily complex enough to escape those theorems. However, it has always been noted that Cowling's theorems apply for an isotropic electric conductivity tensor only. We have identified simple flow configurations and anisotropic tensors of conductivity leading to dynamo action. A two-dimensional flow with localized shear can generate a magnetic field that can even be an axisymmetric magnetic field.

The great advantage of our dynamo solutions is that they are analytical solutions, making them the simplest dynamo solutions obtained until now. This is useful to investigate their properties and to teach the topic to undergraduate students. Moreover, these dynamos are in principle relatively easy to reach experimentally and I will report on an ongoing project of building such an anisotropic dynamo.

Although our motivation for anisotropic dynamos is primarily driven by theoretical, experimental and educational purposes, they are also possibly at work in natural objects. In stars, in galaxies, the electrically conducting fluid, the plasma, can have an anisotropic tensor of conductivity, under the action of the magnetic field, rotation, stellar wind or supernovae explosions. In the Earth's core, one can imagine that an anisotropic inner core, with transient or oscillatory rotation could be a factor of magnetic field generation.

Mots-Clés : Dynamo, analytical solutions, experimental model



Major kinematic revolutions: the underside of the maps

Daniel Aslanian^{1*}, Maryline Moulin¹, Marina Rabineau², Philippe Schnürle¹,
Estelle Leroux¹, Romain Pellen², Joseph Thompson³

¹IFREMER, REM/GM/LGS, Centre de Brest, 29280 Plouzané, France

² CNRS, UMR6538, Domaines Océaniques, IUEM, 29280 Plouzané, France

³ University of Accra, , P.O Box LG 25, Legon, Accra, Ghana:

Earth's surface features, on land and at the ocean floor, are intimately related to the dynamics of the Earth's interior. Large-scale topographic features, such as seafloor spreading ridges, plateaus, volcanic eruptions, mountain ranges, cratonic basins, pediments, and alluvial/fluvial/deltaic/slope/deep systems are the product of numerous parameters interacting in various ways: tectonic history, lithosphere and mantle segmentation, vertical and lateral crustal movements, mantle convection, heat fluxes, lithospheric composition, the presence of fluids, and even the core's dynamo. Subsidence and isostatic rebound, uplift, climatic variation, and fluid escape are profoundly connected to the processes of erosion, sedimentary mass transfer, and ultimately, deposition and storage of material in deep basins. These processes are at the heart of the sedimentary cycle, and at the same time are responsible for generating sedimentary archives of Earth's past geodynamic and climatic activity and landform evolution.

Despite the profound influence of these parameters on Earth's surface features and the societies that inhabit them, the complex nature of their interactions has left critical gaps in their understanding.

We propose here a kinematic reading grid of some events that may give a new view of these interactions.

Mots-Clés : Plate tectonic, Kinematic phases, mantle2mud



Interannual variations of degree 2 from geodetic observations and surface processes

Séverine Rosat^{1*}, Nicolas Gillet², Jean-Paul Boy¹, Alexandre Couhert³,
Mathieu Dumberry⁴

¹ ITES – CNRS - France

² ISTerre – CNRS – France

³ CNES – France

⁴ University of Edmonton – Canada

Geodetic observations from space continuously record surface deformation and global mass redistribution with an increasing accuracy. In parallel, surficial processes (oceanic, atmospheric, and hydrological loading) are more and more precisely modeled. We propose a confrontation of the geodetic GPS and gravity-field satellite laser ranging (SLR) observations at decadal and interannual time scales, in terms of resolution, correlation and comparison with surficial loading models. A focus is made on the degree-2 vertical displacement. At interannual periods, its time variations stay below 0.6 mm. This revises downward the magnitude of 6 years changes put forward in previous studies. Our analysis highlights signals of similar amplitude at various periods, in particular around 3 years. We show that a significant part of the associated patterns can be explained by surface layers (in particular hydrological loadings). Relatively large correlations are observed between GPS and SLR deformation signal, as well as with hydrological loading. GPS time-series do not exhibit any major interannual oscillation that could be associated with a specific degree-2 order-2 geometrical pattern. Interannual gravity changes, in terms of degree-2 Stokes coefficients, show an amplitude less than $2 \cdot 10^{-11}$. The confrontation of deformations from SLR and GPS, in both cases for two families of solutions, show the limits of resolution of these techniques. For the degree-2 interannual deformations, the consistency between the two methods is not high enough to reflect a common global process. Given the limitations in the characterization of surface processes, we conclude that at sub-decadal periods one cannot isolate any signal from the core in the observed fluctuations.

Mots-Clés : GNSS, Satellite Laser Ranging, surface deformation, gravity field, surficial loading, core dynamics



T3.1. Terre primitive



Tectonic evolution in the Archean Ntem Complex (NW Congo Craton, southern Cameroon) from 2.84-2.7 Ga

Contribution from LA–ICP–MS U–Pb zircon and EPMA U–Th–Pb monazite ages.

Joseph M. Akame^{1*}, Marc Poujol², Bernhard Schulz³, Elson P. Oliveira⁴, Vinciane Debaille¹

¹Laboratoire G-Time, Université Libre de Bruxelles, CP 160/02, 50 Avenue F.D. Roosevelt, 1050, Brussels, Belgium.

²Univ Rennes, CNRS, Géosciences Rennes - UMR 6118, F-35000 Rennes, France

³TU Bergakademie Freiberg, Institute of Mineralogy, Division of Economic Geology and Petrology, Brennhausgasse 14, D-09599 Freiberg/Saxony, Germany

⁴Department of Geology and Natural Resources, University of Campinas-Unicamp, P.O.Box 6152, 13083-970Campinas, Brazil.

This contribution examines the strain pattern of the Archean Ntem Complex, located in the northwestern part of the Congo Craton (southern Cameroon). We carried a detailed field study coupled with aeromagnetic map for the two main greenstone belts (Sangmelima and Nyabisan), focusing on the geometry of structures as well as kinematics, and identifying several lithological facies with distinct petrological characters. The time constraints of magmatism, metamorphism and deformation were obtained by U–Pb LA–ICP–MS dating on zircon and EPMA U–Th–Pb dating on monazite.

The Nyabissan Greenstone Belt is dominated by sub-vertical transpressive shear zones with steeply plunging stretch lineations. There are vertical regional fabric domains with sub-horizontal foliation domains suggesting a strain partitioning at a regional scale. Different generations of syntectonic mafic and felsic intrusions attest to long-lasting progressive deformation.

In the Sangmelima granite-greenstone belt (SGB), charnockites and TTG suites formed between ~ 3155 and 2850 Ma. The gabbro intrusion was dated at 2866±6 Ma. Migmatization of the TTG-gneiss, coeval with a sub-horizontal shortening synmetamorphic D₁ event, is dated around 2843–2820 Ma using U–Pb LA–ICP–MS on zircon and chemical U–Th–Pb EPMA dating on monazite. Syn-kinematic monzogranite emplaced 2838±6 Ma ago. D₂ is associated with the F₂ folds and C₂ shear zones coeval with the second anatexis period between ~2788–2722 Ma marked by the emplacement of high-K granite that peaked at ~2750 Ma. Ages of migmatization and syn-kinematic granites (2843 to 2722 Ma) suggest a long-lasting tectonic process in the Sangmelima area. Late Neoproterozoic granitic pegmatite/aplite dikes and/or veins emplaced during the brittle deformation D₃ and ANC protracted cooling between ~2670–2550 Ma.

A synthesis of all results leads to the reconstruction of the general structure for the Ntem Complex, from the Paleo and Neoproterozoic to the Archean domains. In addition, a new model of Archean geodynamic evolution in the NW Congo Craton from 3.32 Ga to 2.55 Ga is proposed.

*Correspondence : J.M. Akame (jakame@ulb.ac.be; akamejosephmartial@gmail.com)



Mots-Clés: TTG, Strain partitioning, EPMA U-Th-Pb , Archean Ntem Complex, Congo Craton



Accessory mineral constraints on crustal evolution: elemental fingerprints for magma discrimination

Emilie Bruand ^{1*}, Mike Fowler ², Craig Storey ², Oscar Laurent ³, C. Antoine ^{1,4},
M.Guitreau ¹, Jean-Luc Devidal ¹, Esa Heilimo ⁵, Oliver Nebel ⁶

¹ Laboratoire Magmas et Volcan, Université Clermont Auvergne - France

² School of Earth and Environmental Sciences, university of Portsmouth – Royaume-Unis

³ Géosciences environnement Toulouse - France

⁴ Université de Genève - Suisse

⁵ University of Turku – Finland

⁶ University of Monash, Melbourne - Australia

Underexplored accessory minerals such as titanite and apatite have the potential to give insights into the nature and the petrogenesis of their host rock. Their trace element and REE- rich compositions carry a record of crystallization history and chemical characteristics of their source. Moreover, titanite and, to a certain extent, apatite are resistant to erosion during sedimentary cycles which makes them ideal to reconstruct the history of long-eroded continental landmasses. Results presented in this contribution, reveal that these underexplored minerals give new insights into their behaviour in magmas through time. In this study, we report new trace element data on apatite and titanite from granitoids of different Archean cratons and comparative granitoids from the Phanerozoic. Trace element signatures of both minerals reveal systematic chemical trends in Y, LREE and Sr contents related to the nature of their host magma, which are used to construct discrimination diagrams delineating Archean TTGs from sanukitoids, and modern adakites from S/I-type granites. By comparing Archean granitoids (TTG and sanukitoids) and their Phanerozoic counterparts (adakite and high Ba-Sr granites), we demonstrate that trace element analysis and detailed petrographic work can give direct information about the petrogenesis of the hostmagmas even when the granitoids have been affected by metamorphism. We show that the robust nature of these phases makes them reliable recorders of petrogenetic information from Archean rocks, that usually have been affected by secondary processes (metamorphism, deformation, hydrothermal activity). Applied to the rock record, both phases potentially provide detailed archives of magmatic evolution through time.

Mots-Clés : TTG, sanukitoid, crustal evolution, trace elements, titanite, apatite inclusion in zircon.



Vers un modèle de dégazage du magma océan définissant la composition de l'atmosphère à l'Hadéen

Fabrice Gaillard^{*1}, Fabien Bernadou¹, Mathieu Roskosz², Mohamed Ali Bouhifd³,
Yves Marrocchi⁴, Giada Iacono-Marziano¹, Manuel Moreira¹, Bruno Scaillet¹,
Gregory Rogerie¹.

¹: Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, CNRS/Université d'Orléans/BRGM, France

²: IMPMC, CNRS, UMR 7590, Sorbonne Universités, Université Pierre et Marie Curie, Muséum National d'Histoire Naturelle, France.

³: Laboratoire Magmas et Volcans, Université Clermont Auvergne, CNRS, IRD, OPGC, France.

⁴: CRPG, CNRS, Université de Lorraine, UMR 7358, France

Nitrogen, carbon, hydrogen and sulfur are essential elements for life constituting less than ca.1 % of terrestrial planet masses. While they are abundant in the atmosphere due to their volatile nature, the Earth's interior represents the major C-H-N-S reservoirs. Capturing the origin of such distribution between surficial and deep reservoirs require deciphering 4.5 Giga-years of planetary activities, with many unknowns.

Here, we show that the mass of carbon, nitrogen and presumably hydrogen outgassed by the last magma ocean episode, 4.5 Giga-years ago, is similar to the mass of these elements in Earth's present-day exosphere (atmosphere+ocean+crust). By modelling the equilibrium partitioning of C-H-O-N-S elements between the magma ocean and its atmosphere, we show that the oxidation state is critical, yielding H₂-CO dominated atmospheres under strongly reduced conditions and CO₂-N₂-SO₂-rich ones under oxidizing conditions. On Earth, magma ocean degassing at reducing conditions must have produced a C-N-H rich atmosphere. Venus's dry, SO₂-poor, CO₂-N₂ atmosphere perfectly corresponds to an equilibration under slightly more oxidized conditions, possibly linked to enhanced hydrogen loss to space due to a long-lasting magma ocean stage⁹. The C-H-N contents of the mantle and the atmosphere must have marginally changed since these reservoirs were born, pushing back the setting of habitability to the very first 100 millions of years of planetary systems.



Étude multi-isotopique de microbialites actuels au sein d'analogues Précambriens (lacs de cratères volcaniques alcalins)

Robin Havas ^{a,*}, Christophe Thomazo ^a, Purificación López-García ^b, Didier Jézéquel ^c,
Miguel Iniesto ^b, David Moreira ^b, Emmanuelle Vennin ^a, Rosaluz Tavera ^d, Karim
Benzerara ^e

^a Biogéosciences, CNRS UMR 6282, Université de Bourgogne Franche-Comté, France

^b Unité d'Ecologie, Systématique et Evolution, CNRS UMR 8079, Université Paris Sud, France

^c IPGP, CNRS UMR 7154, Université de Paris, France

^d Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Universidad Nacional Autónoma de México, DF México, México

^e IMPMC, Sorbonne Université, CNRS UMR 7590, MNHN, France

Les stromatolites représentent les traces de vies les plus anciennes sur Terre depuis au moins 3,5 Ga. Malgré de nombreuses études depuis plusieurs décennies sur ces objets exceptionnels, nombre de questions subsistent quant aux mécanismes de formation, de préservation et aux moyens d'identifier ces structures (et les traces de vie qui leur sont associées) dans le répertoire géologique depuis l'Archéen jusqu'à aujourd'hui. Entre autres, quelles diversités et fonctionnalités de communautés bactériennes et quels environnements et conditions physico-chimiques favorisent leur formation ? Quelles traces de ces conditions subsistent dans les roches anciennes ?

Pour essayer de répondre à ces questions nous étudions des microbialites actuels vivants dans plusieurs lacs alcalins de cratères de volcans au Mexique. Caractérisés par des pH et salinités élevés, des colonnes d'eau fortement stratifiées ainsi que des microbialites abondants, ces environnements lacustres représentent une opportunité unique de caractériser les mécanismes de formation de ces microbialites dans des contextes proches de certains paléoenvironnements archéens.

Nous proposons ici de caractériser le fonctionnement biogéochimique de ces lacs à partir d'analyses isotopiques du C, N, S et O, sur les phases organiques et inorganiques des microbialites, des colonnes d'eau, des particules en suspensions et des sédiments de fond de lac, en parallèle de caractérisations minéralogiques et microbiologiques. Nos premiers résultats montrent des variations importantes des signatures isotopiques de l'ensemble de ces réservoirs, reflétant la stratification des colonnes d'eau et la diversité des réactions et métabolismes en action dans ces lacs.

Ainsi à travers cette approche multidisciplinaire, nous montrerons comment le cycle de ces éléments (C, N, S, O) peut être façonné par des réactions biotiques et abiotiques, comment ils retranscrivent et enregistrent l'action de communautés bactériennes participant à la formation de microbialites, et quelles systématiques peuvent être extrapolées de ces analogues actuels au répertoire archéen.

Mots-Clés : Microbialites ; géochimie ; isotopes ; Archéen ; lacs alcalins



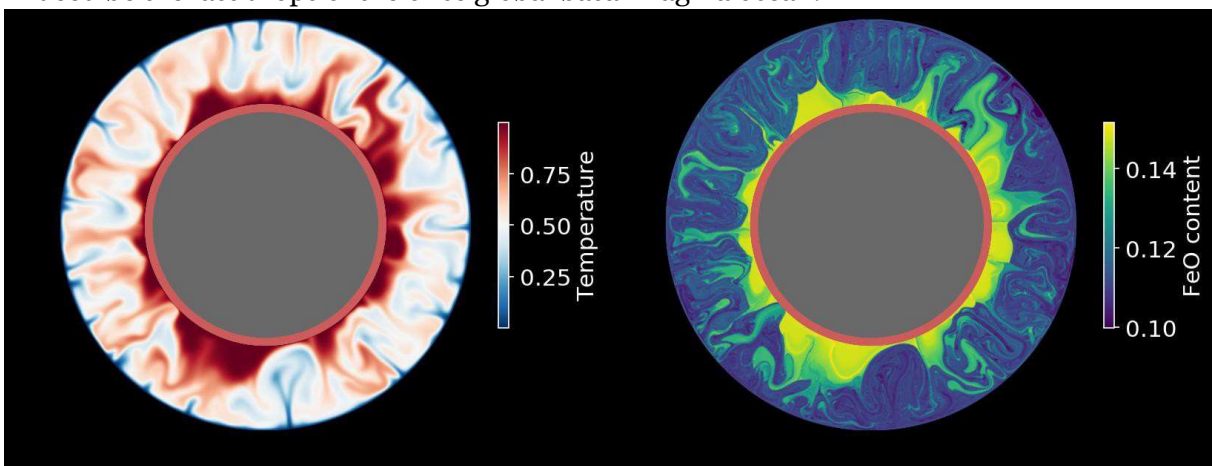
Geodynamical and Geochemical Implications of a Long Lasting Basal Magma Ocean

Stéphane Labrosse^{*1}, Adrien Morison¹, Daniela P. Bolrão², Roberto Agrusta¹, Maxim Ballmer², Antoine Rozel², Renaud Deguen³, Thierry Alboussière¹, Paul J Tackley² and Fabien Dubuffet¹

1: ENS de Lyon, Univ. Lyon-1, CNRS, France.
 2: ETH Zürich, Switzerland.
 3: ISTerre, Grenoble, France.

The seismically detected ultra-low velocity zones (ULVZ) have been suggested to be the remnants of a long-lived dense basal magma ocean (BMO). The presence of a BMO for a few Gyr of the Early history of the Earth should have affected the dynamics of the mantle and the thermal and compositional evolution of the whole Earth. We study these implications using a numerical model solving mantle convection in a spherical shell coupled with the evolution of the basal magma ocean and the core. The model includes the effects of the melting and fractional crystallisation at the bottom of the solid mantle, allowing flow through the boundary by phase change, net motion of the crystallisation front, fractional crystallisation of the magma and the associated dynamical effect of the compositional variations in the solid mantle. In the early stages, the dynamics of the solid is controlled by downwelling currents with a passive return flow, without any hot plumes. Starting with a solid mantle of uniform composition, in chemical equilibrium with the BMO, fractional crystallisation leads to gradual enrichment of the magma in FeO and, subsequently, of the cumulates which eventually become so dense as to resist entrainment by convection. At this stage, the difficulty of downwelling currents to penetrate the dense cumulate layer leads to the formation of a hot boundary layer, the onset of hot plume convection and the piling-up of FeO enriched solid, forming structures akin to the seismically detected large low velocity provinces. Full crystallisation of the BMO takes a very long time to be accomplished, because of the combined effects of progressive enrichment in heat-producing elements and in FeO, which

leads to a decrease in the BMO solidus temperatures. This suggests that ULVZs could indeed be the last drops of the once global basal magma ocean.





Mots-Clés : Magma oceans, mantle convection.



La température des océans de l'Archéen, modélisation des couples isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{30}\text{Si}$ et interactions climat-carbone

Le Hir Guillaume^{1*}, Fluteau Frédéric ¹

¹ : Institut de Physique du Globe de Paris

L'estimation de la température de surface de la Terre primitive est un enjeu crucial pour déterminer les conditions des premiers habitats de la Vie sur Terre. Actuellement deux hypothèses s'opposent. La première, qui repose sur les proxies isotopiques mesurés dans les cherts Archéens, suggère des températures de l'océan très élevées ($>60^\circ\text{C}$) (Knauth and Lowe, 2003; Robert and Chaussidon, 2006; Tartese et al, 2016). La seconde hypothèse suggère des températures plus froides n'excédant pas 40°C (Hren et al., 2009; Blake et al, 2010; Sengupta and Pack, 2018). Cette hypothèse a été récemment renforcée par la modélisation qui, en intégrant les interactions climat-carbone (Charnay et al, 2017), démontre qu'au delà de 40°C l'habitabilité terrestre ne semble pas pouvoir être maintenue. Pour comprendre la raison du désaccord récurant entre ces deux hypothèses, nous proposons ici de modéliser l'évolution des températures de l'océan en intégrant à la fois les contraintes climat-carbone et l'évolution des couples isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{30}\text{Si}$.

Mots-Clés : modélisation, Terre primitive, température océans



Disruption of isotopic age by metamorphism: How can two isotopic clocks can be desynchronised, in a single mineral

Adrien Vezinet^{*1}, Emilie Thomassot^{2,3}, D. Graham Pearson¹, Yan Luo¹, Chiranjeeb Sarkar¹

¹ Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta,

Canada. ² Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG), France.

³ Géosciences Montpellier, Université de Montpellier, France.

High-grade metamorphism often disrupts the isotopic signatures of rocks and minerals. Processes occurring during high-grade metamorphism are best captured through *in-situ* isotope measurement of reactive minerals such as titanite (CaTiSiO_5). To constrain the effect of metamorphism on isotopic signatures at the crystal scale, we examined the U–Pb and Sm–Nd isotope systematics of titanite from an early Archean meta-sediment of the Saglek Block (Labrador, Canada). Titanite yields U–Pb apparent age that is *ca.* 900 Ma younger than the Sm–Nd apparent age, even though both ages are statistically robust. As such, there is a mismatch between U–Pb and Sm–Nd isotopic clocks. We interpret this mismatch as an imperfect isotopes mixing occurring during crystal growth. These findings advocate REE mobility in metamorphism, although REE homogenization was incomplete at the time of titanite crystallization, and demonstrates that significant mixing can go unseen if using single isotope systematics.

Mots-Clés : Archean geology; titanite; U–Pb/Sm–Nd isotopes; laser ablation split stream; metamorphism



T3.2/3 Géodynamiques précambriennes et premières évidences de tectonique des plaques



200 Ma de déformation et de fusion partielle dans la croûte Archéenne: la marge Nord du Craton du Kaapvaal, Afrique du Sud

Jean-François Moyen^{1,*}, Alain Chauvet², Adrien Vézinet^{1,6}, Jean-Louis Paquette³,
Bryan Cochelin⁴, Emilie Bruand³, Johann Diener⁵, Gary Stevens⁶

1. LMV, Université Jean-Monnet & CNRS, Saint-Etienne, France. 2. Geosciences Montpellier, CNRSnFrance. 3. LMV, CNRS, Clermont-Ferrand, France. 4. ISTO, CNRS, Orléans, France. 5. University of Cape Town, South Africa. 6. Stellenbosch University, South Africa

Le style tectonique de la Terre Archéenne reste, malgré des décennies de recherche, un sujet de controverse. Dans les dernières décades, le débat s'est polarisé entre des modèles actualistes (tectonique des plaques), et des modèles non-actualistes très variés, qui n'ont en commun que leur opposition à une tectonique des plaques de type moderne. Bien que le débat soit largement focalisé sur des arguments géochimiques, ou issus de la modélisation géodynamique, un élément clef est la déformation de la croûte continentale, qui permet d'accéder à son état thermique et son état de contraintes.

Le style de déformation emblématique de l'Archéen, les structures en dômes formées par une exhumation rapide de la croûte moyenne au voisinage des ceintures de roches vertes, n'est pas nécessairement le plus répandu. Dans les grandes provinces gneissiques loin des bassins volcano-sédimentaires, on observe plus souvent des foliations verticales bien réglées sur de grandes distances et des linéations horizontales, avec une déformation souvent à forte composante décrochante. Ces structures se développent dans la croûte moyenne anatectique, en présence de liquide.

En Afrique du Sud, la marge Nord du craton du Kaapvaal (province du Limpopo) est un bon exemple de ce type de terrain. Nous y avons conduit une analyse structurale mettant en évidence une déformation transpressive, en présence de liquide de fusion partielle formé dans le faciès amphibolite supérieur ou granulite. Nous avons daté les poches anatectiques syn-déformation ; leur âge s'étale sur 200 Ma, de ca. 2900 à 2700 Ma. Certains corps granitiques montrent des preuves de refusion ultérieure à leur mise en place.

L'ensemble témoigne donc d'une croûte chaude (ou réchauffée) sur le long terme, synchrone d'une déformation lente pendant toute la période, sans exhumation ou enfouissement marqué. Collectivement, ces observations ne correspondent pas à ce qu'on attend d'un système orogénique moderne, ni même d'une succession de phases orogéniques – mais sont aussi incompatibles avec l'exhumation gravitaire rapide de croûte inférieure ou moyenne. Elles amènent à reconsidérer l'opposition artificielle entre « tectonique horizontale » et « tectonique verticale » à l'Archéen, et à chercher à comprendre les caractéristiques propres de la tectonique de la Terre Archéenne.



Effect of metamorphic overprint on early Earth isotopic ages: the case study of Saglek block (Labrador, Canada)

Emilie Thomassot ^{1,2*} - Adrien Vezinet ³ - Graham Pearson ³

¹ CRPG – Université de Lorraine - France

² Geosciences Montpellier - Université de Montpellier - France

³ Université d'Alberta - Edmonton -Canada

For the last 60 years, whole-rock isotope geochemistry has provided benchmark results that have shed light on Earth's evolution. With improvements in analytical resolution, those results have been complemented by spatially resolved information extracted from accessory mineral phases, predominantly zircon. Many of the results recovered from the two approaches on early Earth materials are hard to reconcile. While isotope signatures (e.g. Sm/Nd or Lu/Hf) obtained from whole-rock protocols indicate extensive chemical differentiation of the mantle before 3.6 Ga, those from spatially resolved analysis of individual minerals point toward much less dramatic differentiation, with the majority of crystal domains having sub-chondritic compositions.

To investigate likely reasons for the observed discrepancies between whole-rock and mineral data, here we present a coupled trace element and U–Pb/Hf/O isotope dataset for ca. 3.86 zircon from an early TTG component of the Saglek Block (North Atlantic Craton), for which whole-rock isotopic data have been published.

Lead isotope show 3 distinct zircon crystallization events: (1) an Eoarchean event at ca 3.86 Ga; (2) an early Paleoproterozoic metamorphic event at ca. 3.5 Ga, and (3) a Neoproterozoic event (ca. 2.75 Ga) with zircon domains showing complex zoned overgrowths.

Oldest domains display mantle-like $\delta^{18}\text{O}$ ($+4.9 \pm 0.2\text{‰}$ to $+6.8.0 \pm 0.2 \text{‰}$, $n=30$), while Paleoproterozoic metamorphic domains have sub-chondritic ε_{Hf} and $\delta^{18}\text{O}$ values up to $+9 \text{‰}$, clearly related to a mature supracrustal precursors involved in the reworking of 3.86 Ga crust at ca. 3.5 Ga.

Youngest domains (ca. 2.8-2.7 Ga) display heterogeneous Hf-signature from -23 to -5‰ with homogeneous $\delta^{18}\text{O}$ of $+6.7 \pm 0.1\text{‰}$ ($n=7$).

These results show that large isotopic heterogeneities are preserved at the grain scale. In the light of these intra-sample heterogeneities we will discuss the potential consequences for whole-rock isochrones interpretation.



Evolution tectonique de la partie Sud Est de la Ceinture de Roche Verte de Barberton (Afrique du Sud, Eswatini). Place de l'évènement minéralisateur magmato-hydrothermal et implications sur le style tectonique archéen.

Laurine Travers ^{*1}, Alain Chauvet ¹, Jérémie Lehmann ², Jean-François Moyen ³

¹ Géosciences Montpellier, CNRS France.

² Department of geology, Université de Johannesburg, Afrique du Sud

³ LMV, Université Jean-Monnet & CNRS, Saint-Etienne, France.

Deux évènements tectoniques ont été identifiés comme responsables de la structuration du synforme de Malolotja (Eswatini), dans la partie sud-est de la Ceinture de Roche Verte de Barberton. Le premier évènement est caractérisé par la formation d'une foliation et semble associé à une tectonique tangentielle globalement à vergence Nord. Cet évènement serait responsable de la mise en place de l'unité Onverwacht (la plus ancienne) sur celle de Moodies, l'unité la plus jeune. Le deuxième évènement est responsable de la verticalisation de la foliation acquise lors du premier évènement. Cette verticalisation, résultante d'un serrage NE-SW, est associée à des failles décrochevauchantes. Un réseau de veines de quartz est formé pendant cet évènement. Les veines précoces sont de caractère magmatique- hydrothermal avec un remplissage à feldspath et quartz et les dernières veines du système sont hydrothermales (composées uniquement de quartz). De nombreux arguments sont en faveur d'une mise en place syntectonique des veines dans une foliation préalablement verticalisée en bordure du synforme et en position horizontale au cœur du synforme.

L'analyse microscopique a précisé la nature minéralogique des remplissages des veines et a démontré la présence de minéraux d'altération composés de tourmaline, d'albite et de micas autour des veines, confirmant les observations de terrain. Des pyrites et arsénopyrites actuellement très oxydés sont également présents dans la paragenèse. Ces altérations et la minéralogie sont en faveur d'une minéralisation de nature magmatique-hydrothermale. Le lien avec les granites reste à démontrer.

Les conclusions très préliminaires de ce travail permettent de proposer un modèle d'évolution et de formation en 2 stades, l'un de nature tangentielle et le second associé à une verticalisation des structures. Ce modèle est replacé dans la controverse entre tectonique de type moderne ou archaïque comme responsable de la structuration des domaines archéens.

Mots-Clés : Ceinture de roches vertes, Archéen, Minéralisation aurifère, Barberton, Altération, Déformation



T4.1. Géosciences des régions polaires et subpolaires



PALAS II : une mission exceptionnelle de carottage lacustre dans le nord des Kerguelen

Fabien Arnaud^{1*}, Jostein Bakke², Charline Giguët-Covex¹, Eivind Storen², Aart Verhage², Philip Deline¹, Henriette Linge², Ludovic Ravanell¹, Alexia Jacquemoud¹, Willem Van der Bilt², Violeth Swai², Pierre Sabatier¹

¹EDYTEM, CNRS, Université Savoie Mont-Blanc, France

² Department of Earth Science - Bjerknes Centre for Climate Research – University of Bergen, Norvège

Les zones subpolaires de l'hémisphère sud demeurent relativement vierges en termes de reconstitutions paléoclimatiques, notamment holocènes. Pourtant, soumises aux flux permanent des vents d'ouest et localisées à proximité de plusieurs fronts de masses d'eau océaniques, il s'agit d'une zone-clé pour comprendre la variabilité climatique à court terme qui caractérise notre interglaciaire. Dans ce contexte, l'archipel de Kerguelen, aussi étendu que la Corse, hôte d'une calotte glaciaire en fort recul et riche de plusieurs dizaines de lacs et autant de tourbières présente un potentiel exceptionnel et jusqu'ici peu exploité pour apporter des éclairages inédits sur la variabilité climatique holocène aux hautes latitudes de l'hémisphère sud.

En novembre et décembre 2019, une équipe de 8 scientifiques français et norvégiens a passé un mois en autonomie dans le nord de l'île principale de l'archipel de Kerguelen dans l'objectif de carotter six lacs localisés dans une zone d'environ 15 kilomètres par 15. Grâce aux 4 tonnes de matériel déposés sur 6 sites d'hélicoptère, un total de 14 sites a été carotté et 127m de carottes ramenés en métropole.

Dans cette présentation, après avoir rappelé les enjeux scientifiques, nous reviendrons sur les conditions de réalisations de cette mission hors norme, la plus importante réalisée à Kerguelen au cours des dernières décennies.

Dans un deuxième temps, nous présenterons le potentiel de reconstitution paléoenvironnemental des séquences lacustres prélevées. En nous basant sur des datations par les radionucléides à courte vie, nous discuterons la dynamique du retrait glaciaire actuel qui se caractérise par une chute drastique des apports sédimentaires dans les lacs directement alimentés par un bassin versant glaciaire. En intégrant un jeu d'une cinquantaine de dates radiocarbone, nous pourrions étendre cette analyse à l'échelle des derniers millénaires, voire de l'intégralité de l'Holocène dans certains lacs.

Mots-Clés : Kerguelen ; Subantarctique ; Holocène ; Glaciers ; Paléoclimat ; Sédiments de lac



Missions de terrain en Terre Adélie (Est Antarctique) : apports et perspectives

Jérôme Bascou ^{*1}, Guilhem Barruol ², Guillaume Duclaux ³, Bernard Henry ²,
Gaëlle Lamarque ⁴, René-Pierre Ménot ¹, Yann Rolland ⁵, Christian Sue ⁶

¹ Université de Lyon, UJM, LGL-TPE, Saint-Etienne, France

² Institut de Physique du Globe de Paris, France

³ Université Côte d'Azur, Géoazur, Sophia Antipolis, France

⁴ Ifremer, Geosciences Marines, Centre de Brest, Plouzané, France

⁵ Université de Savoie Mont-Blanc, EDYTEM, Le Bourget du Lac, France

⁶ Université de Bourgogne–Franche-Comté, Chrono-environnement, Besançon, France

Le Craton de Terre Adélie (TAC), de 135 à 146°E, se distingue des autres domaines du bouclier Est Antarctique par une absence d'empreintes tectoniques associées aux orogènes grenvillien et panafricain. Les missions de terrain dans ce fragment préservé du supercontinent Rodinia permettent d'aborder des problématiques régionales au sein du continent Antarctique dont la géologie reste très mal connue mais surtout elles permettent d'avoir accès à de remarquables terrains d'étude pour appréhender la dynamique lithosphérique depuis la transition Archéen - Paléoprotérozoïque, période charnière où s'amorçait la tectonique des plaques moderne. Le programme GEOLETA porté par l'institut polaire (IPEV) a permis de dresser un inventaire des formations géologiques qui se présentent comme une juxtaposition de fragments crustaux néoarchéens (~2.5 Ga) et paléoprotérozoïques (~1.7 Ga). Suite à GEOLETA, le programme ARLITA, via l'installation de stations sismiques temporaires, apporte de nouvelles données pour la cartographie des structures profondes du TAC (épaisseur crustale et structuration du manteau) et de sa limite Est avec le domaine paléozoïque (~0.5 Ga) marquée par la zone de cisaillement du Mertz (MSZ). La technique d'Anisotropie de Susceptibilité Magnétique (ASM) est utilisée pour révéler les structures dans les terrains affectés par l'anatexie et pour cartographier le fluage gravitaire. De nouvelles études pétrologiques et radiochronologiques permettent de préciser l'évolution géodynamique à l'Est de la MSZ et d'apporter de nouveaux éléments pour la connexion avec les terrains du Sud de l'Australie. De nouveaux axes de recherche se développent : l'histoire géologique post 1.5 Ga des zones de cisaillement mais aussi le dernier événement tectonique lié à l'ouverture de l'Océan Austral ou encore le rôle de la dynamique glaciaire sur l'érosion de la marge Antarctique.

De nombreux affleurements rocheux le long de la côte de la Terre Adélie sont pratiquement *Terra Incognita* et sont donc les cibles privilégiées des futures missions. Leur étude sera complétée par celle des blocs de moraines et des données de levés aéromagnétiques associés aux programmes internationaux permettant ainsi l'accès aux terrains les plus au Sud couverts par la glace.

Mots-Clés : Antarctique, Terre Adélie, Archéen, Paléoprotérozoïque



Variations géochimiques des eaux de rivières de l'archipel des Kerguelen : premiers résultats et interprétations

François Chabaux^{1*}, Colin Fournet¹, Thierry Perrone¹, Antton Larrouquis¹,
Anais Montagud¹, Grégoire Mousnier¹, Juliette Voisin¹, Laurent Jeanneau²,
Michel de SaintBlanquat³, Damien Guillaume⁴

1- Institut Terre et Environnement de Strasbourg (ITES) - Université de Strasbourg – CNRS – ENGES - 67000 Strasbourg-France (* auteur correspondant : fchabaux@unistra.fr)

2- Géoscience Rennes - Université de Rennes 1- CNRS- 35000 Rennes, France

3- Géosciences Environnement Toulouse, Université de Toulouse, CNRS, IRD, UPS, CNES, 31400 Toulouse, France.

4- Univ Lyon, UJM-Saint-Etienne, UCBL, ENSL, CNRS, LGL-TPE UMR5276, F-42023, Saint Etienne, France

Pour caractériser les processus d'altération dans des contextes peu impactés par les activités anthropiques, nous proposons de les étudier à l'échelle de l'archipel des Kerguelen, un des territoires émergés les moins impactés par l'activité humaine à l'échelle mondiale. Une campagne d'échantillonnage de rivières de cet archipel fut réalisée en 2019/2020 (Talisker, IPEV 1077) pour constituer une base de données de la composition géochimique des rivières des Kerguelen. Quatre régions différentes ont été sélectionnées, marquées par des contrastes climatiques (pluviométrie essentiellement) et lithologiques (basaltes avec intrusions de roches plus ou moins différenciées) significatifs : Péninsule Courbet (rivière du Château), Plateau Central (rivière d'Armor), Nord-Est Cook (rivière des Monts Ballon) et Presqu'île de la Société de Géographie (plusieurs systèmes hydrologiques).

Les résultats montrent des variations de concentrations en éléments majeurs de ces eaux importantes de près d'un ordre de grandeur. Plus important, les données font apparaître une typologie assez nette de la composition chimique des eaux en fonction des régions étudiées. À l'échelle de l'archipel, ces variations ne peuvent pas s'expliquer par une contribution de pluie variable d'une région à l'autre. Elles ne peuvent pas s'expliquer non plus par la seule diversité des lithologies drainées et de la variation de leur répartition d'une région à l'autre. L'étude des caractéristiques géomorphologiques de ces régions nous conduit à proposer que le contexte géomorphologique des rivières est un paramètre à prendre en compte pour expliquer leur variation géochimique dans ces régions volcaniques sous climat océanique sub-polaire. Plus spécifiquement nos données indiquent qu'une part probablement importante de l'altération des roches se fait dans les zones de colluvions de fond de vallées et qu'à l'échelle de cet archipel les processus d'altération chimique et d'érosion mécanique sont assez fortement découplés spatialement dans le bassin versant. Ces premières données nous conduisent à proposer un schéma conceptuel de la dynamique des processus d'altération et d'érosion à l'échelle de l'archipel, certainement applicable à d'autres contextes subpolaires, qui demande maintenant à être davantage testé.

Mots-Clés : altération et érosion- traçage géochimique- roches basaltiques- eaux de surface - Archipel des Kerguelen



L'oscillation des glaciers sur l'Archipel des Kerguelen au cours du Tardiglaciaire et de l'Holocène à partir de datations cosmogéniques

Joanna Charton ^{*1}, Vincent Jomelli ¹, Irene Schimmelpfennig ¹, Deborah Verfaillie ², Vincent Favier ³, Guillaume Delpech⁴, Régis Braucher¹, Pierre-Henri Blard⁵, Vincent Rinterknecht¹, Damien Guillaume⁶, Claude Legentil⁷,
ASTER Team ¹

¹ Aix Marseille Univ., CNRS, IRD, INRAE, Coll France, UM 34 CEREGE - France

² Earth and Life Institute, Université catholique de Louvain - Belgique

³ Université Grenoble Alpes, IGE, CNRS -

France ⁴ Université Paris-Saclay, CNRS,

GEOPS - France⁵ Université de Lorraine,

CNRS, CRPG - France

⁶ Univ Lyon, UJM-Saint-Etienne, UCBL, ENSL, CNRS, LGL-TPE UMR5276 – France

⁷ Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, CNRS Laboratoire de Géographie Physique - France

L'archipel des Kerguelen constitue un observatoire unique pour l'étude des paléoglaciers. Il s'agit, en effet, de la plus grande surface de terres englacées de la zone subantarctique de l'océan Indien, où de nombreuses formations glacio-géomorphologiques peuvent y être datées. Toutefois, nos connaissances des fluctuations glaciaires sur l'archipel pendant le Tardiglaciaire et l'Holocène restent limitées. C'est pourquoi des échantillons issus de ces morphologies glaciaires ont été collectés dans les vallées glaciaires du glacier Arago, du Val Travers et du glacier Ampère. Les nouveaux âges ³⁶Cl et ¹⁰Be de durée d'exposition au rayonnement cosmique présentés dans cette étude permettent de mieux contraindre la chronologie glaciaire existante au cours des derniers 17000 ans. Une avancée glaciaire a pu être mise en évidence durant le Tardiglaciaire il y a ~14.4 ka sur le site du Val Travers, probablement liée à l'événement froid de l'Antarctic Cold Reversal. Ces résultats sont cohérents avec ceux précédemment obtenus sur l'archipel et plus généralement dans la zone subantarctique, suggérant que tous les glaciers à cette latitude ont été globalement sensibles à ce signal climatique. L'évolution des glaciers à Kerguelen pendant l'Holocène reste en revanche encore largement méconnue. Des datations radiocarbone d'éléments tourbeux sur le site du glacier Ampère suggèrent que les glaciers étaient certainement moins étendus au début de l'Holocène qu'à la fin de l'Holocène. En outre, aucune avancée du début et du milieu de l'Holocène n'a pu être démontrée jusqu'à présent. Enfin, les glaciers semblent avoir réavancé uniquement lors de la fin de l'Holocène. La comparaison de ce nouveau jeu de données avec des âges ¹⁰Be disponibles provenant d'autres régions subantarctiques a permis d'identifier 3 différents schémas possibles d'évolution des glaciers pendant l'Holocène. Parmi ces schémas, l'oscillation des glaciers observée à Kerguelen semble particulièrement originale. Nous discuterons enfin des facteurs climatiques pouvant rendre compte de l'évolution des glaciers à Kerguelen (température, précipitations).

Mots-Clés : fluctuations glaciaires, paléoclimatologie, datation par isotopes cosmogénique, Tardiglaciaire, Antarctic Cold Reversal, Holocène, subantarctique, Kerguelen.



Caractérisation des conditions de serpentinisation du manteau de Kerguelen et implications sur l'histoire géodynamique du plateau

*Nicolas Cortiade ¹ – Adélie Delacour ¹ – Damien Guillaume ¹
Bertrand Moine ¹ – June Chevet ¹ – Michel Grégoire ² – Jean-Yves Cottin ¹

1 : Laboratoire de Géologie de Lyon, Terre-Planète-Environnement (LGL-TPE), Université Jean-Monnet, Saint-Etienne, Université de Lyon, France

2 : Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse (GET), Université de Toulouse, Toulouse, France

Le plateau de Kerguelen Broken-Ridge, la deuxième plus volumineuse Grande Province Magmatique (ou LIP, Large Igneous Province) après Ontong Java, se distingue par la présence exceptionnelle d'une grande diversité de xénolites mantelliques, des fragments du manteau remontés en surface par des laves basaltiques lors d'éruptions particulières. Parmi ces xénolites, ceux des gisements du Lac Michèle et de la Table de l'Oiseau (Péninsule Loranchet, nord de l'archipel de Kerguelen) sont des péridotites de type harzburgites à spinelle ultra-réfractaires, formées il y a 1 milliards d'années suite à un épisode de fusion partielle intense et affectées, par la suite, par des circulations de fluides complexes induisant une modification de leur composition minéralogique et chimique. Cependant, la nature des circulations de fluides et leurs interactions avec les péridotites restent mal connues, ainsi que le timing et la dynamique des différents événements. Les données pétrographiques (microscopie optique, Raman, DRX) et géochimiques obtenues sur roche totale et couplées à des analyses élémentaires *in-situ* ont permis de i) mettre en évidence différents processus d'interaction avec des fluides (serpentinisation et/ou métasomatisme) et/ou des liquides magmatiques et ii) de déterminer les conditions de formation des phases minérales secondaires et iii) de mieux contraindre la nature des fluides à l'origine de leur formation. Ces résultats apportent de nouvelles contraintes sur la présence de fluides et/ou melts riches en H₂O et/ou CO₂ au sein du manteau et soulèvent de nouvelles questions sur les implications générales de la présence de tels fluides sur l'évolution de la GPM, sur les cycles profonds du carbone et de l'eau et sur les transferts d'éléments chimiques entre les enveloppes profondes et superficielles de la Terre.

Mots-Clés : Xénolites mantelliques ; Dynamique des fluides dans le manteau ; Panache mantellique ; Kerguelen



Histoire de la cartographie géologique des Iles Kerguelen

Jean-Yves Cottin^{1,*}, Gilbert Michon¹, Michel Grégoire², Bertrand Moine¹,
Guillaume Delpech³, Damien Guillaume¹, Marie-Christine Gerbe¹, June
Chevet¹, Hervé Leyrit⁴, Michel de Saint Blanquat², Léandre Ponthus² et
André Giret¹

1: LGL-TPE, Université Jean-Monnet, Saint-
Etienne 2: Laboratoire GET, Université de
Toulouse, Toulouse
3: Géosciences Paris Sud, Université Paris
Saclay, Orsay 4: UniLaSalle, Beauvais

L'évolution des connaissances géographiques et géologiques depuis les premières cartes de reconnaissance de Kerguelen jusqu'aux cartes géologiques récentes est retracée. Ces travaux ont été menés en particulier avec le support des programmes IFRTP-IPEV CARTOKER, GEOCHRONOKER, CARBONATOKER, DYLIOKER et TALISKER. Cette présentation

s'appuie sur l'évolution des contours géographiques de l'archipel, et de ses structures géologiques sous forme de dessins, cartes, coupes et sur des photos de paysages représentatifs de l'histoire géologique des Kerguelen, le plus vieil archipel (> 30 Ma) dans l'océan le plus jeune (120 Ma). Un rapide éclairage sur la réalisation des cartes géologiques de Crozet, Amsterdam, Saint Paul illustrera également cette communication. Le plan suivra la chronologie des découvertes: 1- l'utopie du continent austral (Terra Australis Incognita) 1772-76 (Y. de Kerguelen, J. Cook); 2- les chasseurs de phoques et l'expédition de J.C. Ross (1840); 3- l'approfondissement des connaissances cartographiques et géologiques; les expéditions Antarctique du Gauss (1901-1903), J.B. Charcot (H et R Rallier du Baty 1908- 1909), Challenger (1908-1925), la Curieuse (1913-1914); 4- la première carte géologique embryonnaire (Aubert de la Rue 1928-32), 5- la concrétisation de la territorialité française et les premiers hivernages scientifiques (1949), l'Année Géophysique Internationale (1958); 6- la carte géologique (1/200 000, Thèse de J. Nougier 1961-1970 en relation avec L. Leclaire et

N. Watkins); 7- les complexes annulaires océaniques (J. Lameyre, A. Giret, B. Bonin); 8- la cartographie géologique moderne et la connaissance profonde de l'archipel (1/100 000, 1987-2020); 9- le temps de la Réserve Naturelle; 10- l'actualisation des processus d'intrusion et d'exhumation des plutons en milieu océanique et un retour au dessin de la carte géologique.

Mots-Clés : Georgia Taille 9



Soulèvement et déformation Cénozoïques dans la région des Admiralty Mountains (Victoria Land septentrionale, Antarctique).

Valerio Olivetti^{*1}, Maria Laura Balestrieri², Federico Rossetti³, Cécile Gautheron⁴,
Silvia Cattò¹, Massimiliano Zattin²

¹ Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova, Padova, Italia

² Istituto di Geoscienze e Georisorse, Consiglio Nazionale delle Ricerche, UOS Firenze, via G. La Pira 4, 50121, Firenze, Italia

³ Dipartimento di Scienze, Università degli Studi Roma 3, Roma, Italia

⁴ GEOPS, Université Paris Sud-XI, Orsay, France

La région des Admiralty Mountains constitue la terminaison nord des Montagnes Transantarctiques (TAM). Les Montagnes Transantarctiques représentent l'épaule de rift soulevée le long de la transition entre deux structures lithosphériques rhéologiquement différentes. Peu de données quantitatives sont disponibles pour reconstruire l'évolution morpho-tectonique cénozoïque de ce secteur de la plaque antarctique, où le TAM présente des caractéristiques particulières telles qu'une topographie élevée, des caractéristiques morphologiques de type alpin et l'absence de la couverture sédimentaire de Beacon (Permo- Jurassique). Pour ces raisons, il a été proposé que la région des Admiralty Mountains soit le lieu de la déformation tectonique, de l'exhumation et de la morphogenèse les plus récentes, depuis le Miocène, dans l'ensemble du TAM.

Nous présentons ici une étude intégrée basée sur l'analyse structurale de terrain, sur données thermochronologiques et l'analyse de la topographie. La thermochronologie sur apatite (AFT et U-Th/He) est utilisée pour détecter les mouvements verticaux différentiel entre deux domaines de la croûte et pour mesurer la quantité d'exhumation crustale. Nous avons utilisé la quantité d'épaisseur crustale érodée pour reconstruire les profils rétro-érodés et calculer la charge érosive afin de tester les modèles de soulèvement par flexion lithosphérique.

Nous avons constaté que nos profils rétro-érodés sont mieux reproduits par une épaisseur élastique de la lithosphère de valeurs intermédiaires ($T_e = 20-30$ km). Cela suggère que, sous les Admiralty Mountains, les propriétés élastiques de la lithosphère sont différentes par rapport aux autres secteurs du TAM, probablement en raison d'une anomalie thermique stationnaire dans le manteau supérieur pendant le Cénozoïque.

Mots-Clés : Tectonique de l'Antarctique, soulèvement Cénozoïque, thermochronologie



Geochronology (U-Pb, Ar/Ar, AFT, ^{10}Be) of Terre Adélie - insights for the geological history of East Antarctica

Yann Rolland^{1*}, Guillaume Duclaux², Jérôme Bascou³, Christian Sue⁴, Matthias Bernet⁵, Julien Carcaillet⁵, Olivier Bruguier⁶

¹EDYTEM, Université de Savoie Mont-Blanc – CNRS, Le Bourget du Lac, France.

²Université Côte d'Azur, CNRS, Géoazur, 250 rue Albert Einstein, Sophia Antipolis,

France.³Université de Lyon, UJM, LGL-TPE, Saint Etienne, France.

⁴Chrono-environnement, Université de Bourgogne–Franche-Comté, Besançon, France

⁵Université Grenoble Alpes, Université Savoie Mont-Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, ISTERRE, Grenoble, France.

⁶Géosciences Montpellier. CNRS - Université Montpellier, France.

In this contribution, we synthesize recent geological works undertaken on Terre Adélie during the GEOLETA and ArLita programs. The Terre Adélie Craton displays a long geological history emphasized by 2 high grade metamorphic events during the Neoproterozoic (2.6-2.4 Ga, M1) and Paleo-Mesoproterozoic (1.7-1.5 Ga, M2).

Some greenschist facies sheared metagranites found as moraine boulders document an early, possibly collisional, greenschist facies metamorphism, located in the interior of Terre Adélie. This greenschist event has been dated by in-situ U-Pb on titanite at 1745 ± 7 Ma for the first time in 2021. The trace of this event can be

evidenced in the core of zircons dated in the Dumont D'Urville Basin. At the scale of the Mawson continent, this event is related to (1) a possible block accretion and/or growth of an active margin above an oblique subduction zone since 1.75 Ga until 1.6 Ga, followed by (2) a large-scale hot-spot event responsible for the permanence of high-grade metamorphism (700-800°C) along the Terre Adélie Coast at 1.6-1.5 Ga. This deep crustal evolution is followed by a marked erosion during the Late Palaeozoic Ice Age, recorded by Apatite Fission Track thermochronology. These data show cooling of the Proterozoic Terre Adélie Craton below ~120°C between 350 and 300 Ma, suggesting >4 km temperate glacial erosion. This evolution is ascribed to a dynamic erosion of glaciers in this time range while the south pole was in a similar position as today.

Afterwards, a null erosion occurred in the Mesozoic and less than 2 km erosion is recorded during the major glaciation of the Cenozoic. Finally, the Quaternary history is recorded by cosmogenic dating of moraine boulders. Based on glacial flux maps, the origin of the boulders may be located ~400 km upstream. ^{10}Be datings of boulders cluster within the last 30 ka. Cosmogenic ages from the Lacroix Nunatak suggest a main deglaciation after the Younger Dryas at ca. 10 ka, while those of Cape Prud'homme mostly cluster at 0.6 ka, in agreement with an exhumation of boulders during the Little Ice Age.

Mots-Clés : Subglacial incision, deglaciation, exhumation, U-Pb and Ar-Ar dating, Fission-Track dating, Cosmogenic Nuclide dating.



Evolution au cours des derniers siècles et future de la calotte Cook aux Iles Kerguelen: datations cosmogéniques et modélisation glaciologique

Deborah Verfaillie ¹, Joanna Charton ^{*2}, Irene Schimmelpennig ², Zoe Stroebele ³,
Vincent Jomelli ², François Bétard ⁴, Vincent Favier ⁵, Julien Caverio ³, Etienne
Berthier ⁶, Hugues Goosse ¹, Vincent Rinterknecht ², Claude Legentil ³, Raphaëlle
Charrassin ⁶, ASTER Team ^{#2}

¹ Earth and Life Institute, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique

² Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, Coll France, UM 34 CEREGE, Aix-en-Provence, France

³ Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, CNRS Laboratoire de Géographie Physique, Meudon, France

⁴ Université de Paris, UFR Géographie, Histoire, Economie et Sociétés (GHES), Laboratoire PRODIG, UMR CNRS8586, Paris, France

⁵ Univ. Grenoble Alpes, IGE, CNRS, Grenoble, France

⁶ LEGOS, Université de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS, Toulouse, France

[#] Georges Aumaître, Didier L. Boulès ([†]), Karim Keddadouche

Depuis ces dernières décennies la calotte Cook aux Iles Kerguelen connaît un recul particulièrement prononcé avec des taux de fonte parmi les plus élevés au monde. Ce recul a déjà de lourdes conséquences pour la biodiversité sur l'archipel, les glaciers constituant jusqu'alors une barrière difficilement franchissable pour certaines espèces invasives. Leur disparition pourrait entraîner une profonde modification des écosystèmes dans ces îles classées récemment au patrimoine mondial de l'Unesco. Pour replacer cette évolution glaciaire exceptionnelle dans un contexte multicentenaire, nous avons affiné l'évolution de la calotte Cook au cours du dernier millénaire, étudié les conditions climatiques associées et exploré son évolution potentielle d'ici 2100 CE. Un modèle glaciologique, contraint par la datation de l'exposition au rayonnement cosmique de moraines, des documents historiques et des observations récentes du bilan de masse glaciaire, a été utilisé pour simuler l'étendue de la calotte glaciaire pendant différentes phases d'avancée et de recul entre le dernier millénaire et 2100 CE. Les datations cosmogéniques suggèrent une avancée glaciaire autour du début du Petit Age Glaciaire, ce qui est cohérent avec les résultats d'autres études subantarctiques, et les conditions plutôt froides et humides engendrées par la phase négative du Mode Annulaire Austral. Cette étude contribue à notre compréhension actuellement limitée du paléoclimat pour le début du Petit Age Glaciaire dans le sud de l'océan Indien. La modélisation et les observations glaciologiques confirment la récente diminution de l'étendue de la calotte Cook liée à l'intensification du Mode Annulaire Austral. Bien qu'affectées par de grandes incertitudes, les simulations futures suggèrent une disparition complète de la calotte d'ici la fin du siècle.

Mots-Clés : Iles Kerguelen, calotte Cook, datations cosmogéniques, moraines, modélisation glaciologique



Processus de formation de *bedforms* triangulaires sous la paléo-calotte Scandinave : géomorphologie glaciaire et modélisation analogique

Jean Vérité^{*}, Édouard Ravier¹, Olivier Bourgeois², Paul Bessin¹, Stéphane Pochat²

¹ Laboratoire de Planétologie et Géodynamique - UMR 6112 - Le Mans Université - France

² Laboratoire de Planétologie et Géodynamique - UMR 6112 - Université de Nantes - France

La connaissance des systèmes hydrologiques sous-glaciaires est primordiale afin de comprendre les dynamiques actuelles et passées des calottes polaires. L'acquisition de nouveaux modèles numériques de terrain de haute résolution (LiDAR) permet une meilleure cartographie des objets géomorphologiques, bases de la reconstruction des systèmes hydrologiques sous-glaciaires. Des *bedforms* sous-glaciaires triangulaires, auparavant inconnus, ont été récemment découverts sous la paléo-calotte scandinave associés avec des couloirs de circulation d'eau de fonte et des *ribbed bedforms*.

Nous explorons ici l'environnement sous-glaciaire dans lequel se développent les *bedforms* triangulaires ainsi que leur relation génétique avec les *ribbed bedforms* à partir (i) d'un modèle expérimental reproduisant la dynamique de calottes glaciaires et la formation des *bedforms* sous-glaciaires et (ii) d'une analyse de la distribution et de la morphométrie de *bedforms* cartographiés en Suède et en Finlande, sous la paléo-calotte scandinave.

Cette étude montre que des *bedforms* triangulaires peuvent se développer à la base des calottes glaciaires en association avec des *ribbed bedforms* inondés lors de crues sous-glaciaires, lorsque le système hydrologique subit des réorganisations périodiques. L'analyse morphométrique des *bedforms* expérimentaux et naturels met en évidence un continuum allant de *bedforms* allongés, de faible circularité et de faible sinuosité (i.e. *ribbed bedforms*) à des *bedforms* peu allongés, de forte circularité et de forte sinuosité (i.e. *bedforms* triangulaires). Le développement des *bedforms* triangulaires est interprété comme résultant de transformations de *ribbed bedforms* lors de débordements (i.e. crues) périodiques d'un système de drainage chenalisé. Ces crues induisent des phases répétées de découplage et de couplage entre les *bedforms* et la glace, respectivement à l'origine de processus d'érosion et de dépôt par l'eau et de processus de déformation et d'étirement par la glace des *bedforms*, développant progressivement des formes triangulaires.

Ainsi, durant le retrait des calottes glaciaires polaires, la mise en place de couloirs de circulation d'eau de fonte induit une remobilisation de champs de *ribbed bedforms* et la formation de *bedforms* triangulaires.

Mots-Clés : géomorphologie glaciaire, calotte scandinave, *bedforms* triangulaires



Plutonisme dans une croûte océanique transitionnelle : structure, âge et mise en place du laccolite de Rallier du Baty, îles Kerguelen

Michel de Saint Blanquat^{1*}, Léandre Ponthus¹, Damien Guillaume², Michel
Grégoire¹, Marc Le Romancer³, Norman Pearson⁴, Suzanne O'Reilly⁴

1: Laboratoire GET, Université de Toulouse,

Toulouse2: LGL-TPE, Université Jean-
Monnet, Saint-Etienne

3: Géoarchitectures, Université de Bretagne

Occidentale, Brest4: GEMOC, Macquarie University,
Australie

Les îles Kerguelen, située dans la partie sud de l'océan Indien, correspondent à un domaine émergé de la partie nord du plateau de Kerguelen-Heard formé par l'activité du point chaud du même nom. Leur principale originalité géologique réside dans l'existence d'une croûte anormalement épaisse pour une lithosphère océanique ainsi que dans la présence d'ensembles de roches plutoniques de compositions s'étalant d'ultrabasiques à acides. Différentes études (Grégoire et al. 1995 ; Grégoire et al. 1998) ont interprété ces données comme témoignant de la formation d'un proto-continent. Kerguelen représenterait donc un exemple actuel de nucléation continentale.

La péninsule Rallier du Baty abrite plusieurs complexes de roches plutoniques différenciées. Le complexe sud a été décrit au cours des campagnes des années 70 comme un complexe annulaire (Lameyre et al. 1976; Dosso et al. 1979) c'est-à-dire un ensemble de dykes concentrique injectés suite à l'effondrement d'un bloc crustal dans une chambre magmatique sous-jacente (Bonin 1982).

Nos nouvelles données structurales et géochronologiques montrent que ce complexe intrusif est un laccolite qui s'est construit en 3,7 Ma environ, entre 11,6 et 7,9 Ma, par injections successives de magmas. L'injection discontinue de magmas par sous accrétion, à une vitesse moyenne de 0,8 à 1,4 km³/Ma, a progressivement soulevé les basaltes encaissants.

Nos résultats montrent que ce pluton, le seul exemple connu de laccolite felsique situé en contexte océanique intraplaque, a les mêmes caractéristiques principales que de nombreux plutons similaires mais situés dans la croûte continentale. Nous proposons que le paramètre critique à l'origine de cette similarité, et permettant donc la production de magmas différenciés en contexte océanique est l'épaisseur de la croûte.

Mots-Clés : Magmatisme alcalin, Kerguelen, plateau océanique, intrusion syénitique, mise en place des plutons



T5.2 Minéralogie et transition énergétique / Métaux de la transition énergétique



Les constituants du béton de Génie Civil dans la transition énergétique : nouveaux bétons pour énergies renouvelables et mobilité plus douce

Patricia Brédy, Consultante Groupe Vicat
Pierre-Antoine d'Argento, UNICEM

Les solutions en béton ont de beaux atouts, coûts, tenue mécanique et durée de vie, pour la construction des ouvrages de production d'énergies renouvelables et de mobilité dans une logique d'aménagement durable des territoires et de transition écologique.

Mais, le béton affiche une intensité carbone qui représente jusqu'à 35% du poids carbone dans les constructions actuelles, la quasi-totalité des émissions de carbone étant libérées dès sa fabrication.

Le béton est un matériau ancien et devient un matériau de plus en plus technique. Il est constitué de liant hydraulique (ciment), de granulats (qui peuvent être des granulats naturels ou recyclés) et d'eau. On peut également lui incorporer des adjuvants, des additions minérales (souvent d'anciens déchets ou co-produits), ainsi que des fibres.

Les innovations actuelles en matière de béton concernent l'ouvrage (conception et dimensionnement par exemple), le matériau (bétons dits bas-carbone ou éco - conçus), l'optimisation de ses constituants (exploitation des matières premières ou recyclage des matériaux), ainsi que les process de fabrication des liants : essentialiser la matière, conserver l'existant au maximum, mixer les matériaux, ré-utiliser et ré-employer en utilisant des déchets ou des co-produits.

Dans cet exposé nous passerons rapidement en revue 3 solutions béton au service des énergies renouvelables : béton pour éolienne, béton pour barrage, béton pour fondations géothermiques

Un focus particulier sur le TELT (Tunnel Lyon-Turin) nous permettra de nous questionner sur les matériaux d'excavation dans le cadre d'ouvrages exceptionnels.

Aujourd'hui, il n'existe pas de définition normée d'un béton dit « bas carbone » mais des recommandations sont proposées ou en cours de rédaction. L'intensité carbone moyenne du béton est d'environ 210 kgCO₂e/M³. Un béton conforme à une stratégie SNBC (Stratégie Nationale Bas Carbone) avec un millésime 2030 pourrait afficher une intensité carbone à hauteur de 135 kgCO₂e/m³. Certains ciments alternatifs prometteurs répondront rapidement à cette définition.



Les minéraux industriels pour les applications bâtiments et infrastructures : innovations et réduction des impacts CO₂

Par Armand Dubus (IMERYS)

Les minéraux industriels sont présents dans des milliers de produits de la vie quotidienne et dans de nombreuses applications industrielles (réfractaires, pharmaceutique, plastiques, filtration, énergie mobile...). Ils interviennent également dans le secteur du bâtiment et des infrastructures, et peuvent jouer un rôle dans l'amélioration du bilan carbone des applications visées. L'exposé présentera deux exemples.

En premier lieu, l'utilisation des argiles kaoliniques pour la production de métakaolins, pouvant être utilisé comme composant d'un ciment « bas carbone » type LC3. L'utilisation de ces métakaolins permet de réduire la quantité de clinker dans la production de ciment portland, et donc de réduire leur empreinte carbone. D'autres minéraux industriels présentent ces caractères de pouzzolanité comme la perlite broyée, et ces applications peuvent aussi s'adapter aux bétons.

Dans l'exemple des gisements d'argiles kaolinique du bassin des Charentes, les argiles sont actuellement exploitées majoritairement pour l'industrie réfractaire. Certaines argiles aujourd'hui peu utilisées peuvent convenir à une production de métakaolin, ce qui va dans le sens d'une meilleure utilisation des ressources minérales, point de plus en plus important au regard de l'acceptabilité sociétale de l'industrie extractive.

Le second exemple proposé est relatif à l'utilisation de ciments d'aluminate de calcium (CAC) pour le bâtiment et les infrastructures. Les CAC sont produits par un processus de fusion de bauxite et de calcaire, avec un impact carbone du même ordre de grandeur qu'un ciment Portland classique.

L'application d'un enduit à base CAC à la surface des ouvrages d'assainissement en bétons permet d'augmenter leur durée de vie en les protégeant du phénomène d'attaque de corrosion biogénique causé par le H₂S. La solution traditionnellement utilisée est la mise en place de résine epoxy sur les surfaces concernées, avec l'inconvénient d'une nécessité de remplacements plus fréquents et la génération de micro plastiques dans l'eau. La solution à base de CAC permet de diminuer l'impact carbone des infrastructures d'assainissement, en allongeant leur durée de vie.



La substitution et le recyclage : planches de salut ou mirages ?

Florian Fizaine, Maître de conférences en sciences économiques à l'Université de Savoie Mont-Blanc, chercheur spécialiste des questions énergie et métaux

Question pourtant ancienne, la problématique de la disponibilité des matières premières rejaillit depuis une dizaine d'années, à la fois au travers des médias, mais aussi via un regain d'intérêt de la part des scientifiques. Cette inquiétude se cristallise au travers de trois prismes différents : la géopolitique des matières premières (notamment la crise des terres rares), les métaux pour la transition énergétique ainsi que l'épuisement des ressources et la soutenabilité de la croissance économique.

Pivot central de la théorie économique, on évoque souvent la substitution comme l'un des leviers d'action de la demande face à une hausse du prix d'une matière première ou des ruptures d'approvisionnement sur le volume. Cette présentation vise à déterminer dans quelle mesure, la substitution est véritablement un levier d'action contre les pénuries. Dans un premier temps, la présentation rappellera les différentes échelles et formes de substitution. Nous verrons ensuite si ce phénomène peut être vu comme un ensemble homogène notamment en questionnant l'hétérogénéité des situations relative aux différentes échelles de substitution matérielle. Finalement, nous reviendrons sur les cas de substitutions historiques et actuels tout en explicitant les multiples contraintes techniques, économiques, socioculturelles et juridiques qui limitent la substitution intra-matérielle. Un dernier point sera consacré au recyclage qui peut être considéré comme une forme de substitution de métaux primaires par des métaux secondaires.



Exploration des minéralisations de la Transition Énergétique. L'HexaCBA : Une nouvelle pratique de traitement des données Géologiques et Géographiques

Jérôme Gouin^{*1}, Bruno Tourlière², Mario Billa³, Guillaume Bertrand⁴

1- Pôle AVENIA, Pau – France

2- Collaborateur extérieur BRGM, Orléans - France

3- Collaborateur extérieur Pôle AVENIA, Pau - France

4- Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

Pour réaliser des cartes prédictives de minéralisation les procédures de traitement combinent 2 principes : i) Data driven caractérisé par l'établissement de règles relationnelles quantifiées et combinées pour parvenir à une carte de répartition des zones favorables, ii) Expert, caractérisé par la recherche de combinaisons de paramètres favorables préétablies dans des modèles de gisements ou de systèmes minéralisés.

Dans le cadre des thématiques métaux rares, différentes adaptations ont été recherchées (Cassard et al. 2015). Par exemple, les traitements appelés CBA (Tourlière et al. 2015), à maille carrée ont été utilisés pour la recherche de signatures géologiques en limitant les effets de l'imprécision des localisations.

L'HexaCBA -Hexagonal Exploration Cell Based Analysis – est une extension des principes de la CBA à une grille de cellules hexagonales. Cette méthode permet d'extraire une importante quantité d'informations présentes dans un système d'information géographique (SIG) afin de les traiter avec des outils statistiques, classifications, régressions et outils basés sur l'intelligence artificielle. Cette extraction est réalisée dans un ensemble de cellules de 10 à 20 km de diamètre, compatibles avec la taille de cellules hydrothermales minéralisées.

L'utilisation de cellules hexagonales permet aussi de diminuer certains effets d'anisotropie liés aux cellules carrées.

Cette approche a été testée pour des thématiques soutenues par le pôle AVENIA : Germanium, Lithium minéral vs géothermal, traitements combinés dans les Pyrénées ; avec perspective possible vers Hydrogène et Hélium natif.

Références :

Cassard, D., Bertrand G., Billa M., Serrano J.J., Tourlière B., Angel J.M. and Gaál G. (2015). ProMine Mineral Databases: New Tools to Assess Primary and Secondary Mineral Resources in Europe. In Predictive Modelling of Major Mineral Belts in Europe, pp 9-58. Springer.

Tourlière B., Pakyuz-Charrier E., Cassard D., Barbanson L. and Gumiaux C. (2015). Cell Based Associations: A procedure for considering scarce and mixed mineral occurrences in predictive mapping. Computers and Geosciences 78, 53-62.

Mots-Clés : Métaux rares, carte prédictive, hexaCBA, France



La chaîne d'approvisionnement des métaux critiques et ses implications en exploration manière

Par Christian Hocquard

La transition énergétique basée sur le tout électrique associé aux énergies renouvelables (EnR : éolien et photovoltaïque) est une perte de souveraineté. En effet, les filières amont-aval des équipements (supply chain) des EnR dépend d'importations. Les gisements européens en production ou encore en terre (identifiés mais non exploités ou exploitables) sont, à quelques rares exceptions près, trop petits pour justifier *per se* une transformation métallurgique jusqu'aux semi-produits et autres compounds indispensables. Nombre de filières de petits métaux rares sont déjà contrôlées (en fait verrouillées) par la Chine qui fera les prix. Celle-ci continue d'ailleurs à prendre le contrôle des gisements de qualité (REE, Li, Co, etc.) dans les pays émergents (Afrique, Asie, Am. latine) par tous les mécanismes possibles, notamment des prêts de développement avec offtake et prise de participation, servie en cela par le méga projet de la nouvelle route de la soie (one road, one belt). Si les Etats-Unis ont réagi, l'Europe a clairement choisi de se mettre en situation de dépendance. On a juste mis la charrue avant les boeufs. Trop tard ? non, mais un enjeu rendu complexe il est vrai, avec les capacités chinoises de yoyo sur les cours



La criticité métal et matériaux : mine, révolution et intérêt général

par Didier Julienne

Avant puis pendant l'ère des révolutions industrielles, les métaux ont participé au développement des nations. Depuis la chute du mur de Berlin, la mondialisation des échanges est monopolisée par la Chine et la croyance en un monde régulé par la globalisation des échanges bénéfique à tous s'est érodée à cause de la crise climatique. Les recherches de souveraineté post Covid-19 en sont le révélateur cruel.

Pourtant, le progrès continuera de dicter la ligne de conduite des sociétés humaines mais avec des limites parfois inattendues. Un État peut être en alerte sur l'accès aux matières premières agricoles, à l'énergie, à l'eau voire aux ressources minières. Pour ces dernières, quelle pensée une nation comme la France doit-elle adopter?



Le graphite, comment dessiner le futur ?

Éric Marcoux
Professeur à l'université d'Orléans

Le graphite, carbone pur cristallisé, est un minéral industriel aux multiples propriétés qui se présente en microcristaux, en paillettes, ou en masses écailleuses. Il est essentiellement métamorphique, issu de carbone organique ou de la réduction de roches carbonatées, bien qu'on puisse aussi le rencontrer en contextes magmatique ou hydrothermal. La production 2020 de graphite naturel (environ 1,1 million de tonnes par an) est écrasée par la Chine (60 %) mais ne suffit pas : elle est complétée par du graphite de synthèse (environ 1,5 million de tonnes). L'Europe ne compte que pour 1,5 % de la production mondiale avec une seule mine notable, Skaland en Norvège. Ses propriétés à la fois de métal et de non-métal lui valent de multiples utilisations industrielles en sidérurgie, pour la production d'acier et d'aluminium, en énergie pour la fabrication des batteries lithium-ion et des piles alcalines, sans oublier des usages traditionnels comme réfractaires, et innovants comme le graphène etc. L'explosion attendue de la demande de batteries lithium-ions et de dispositifs de stockage d'énergie augure d'un accroissement exponentiel de la demande en graphite



Le tungstène, métal de l'extrême

Thomas Poitrenaud¹

(ex Variscan Mines, ex Mines du Salat)

Tungstène provient du suédois « tung sten » qui signifie littéralement « lourde pierre ». Ce métal grisâtre, dur et cassant fut découvert en 1781 par le chimiste suédois Carl Wilhelm Scheele qui isola l'acide tungstique à partir de la scheelite (CaWO_4) en 1821. Ses principales propriétés en font un métal de l'extrême : sa dureté (7,5 sur l'échelle de Mohs) ; sa réfractarité (la plus élevée de tous les métaux avec une température de fusion de 3422°C) ; sa forte densité ($19,25 \text{ g/cm}^3$) ; sa résistance à la traction (même à température élevée) ainsi que son très faible coefficient de dilatation thermique ($4,2 \cdot 10^{-6} \text{ m/m.K}^{-1}$). Il est couramment employé dans des nombreuses industries pour créer des produits de grande dureté et résistants aux températures extrêmes.

Le tungstène est un métal critique pour l'union européenne et incontournable dans de nombreuses applications industrielles de haute technologie, ce qui lui confère sa nature stratégique. Sa situation tendue sur le marché de l'approvisionnement et son importance pour l'industrie sont les deux principaux paramètres ayant justifié son classement en forte criticité par l'Union Européenne en 2009.

Les conjectures sur son avenir sont unanimes. Etant donné son caractère stratégique pour l'industrie et le quasi-monopole exercé par la Chine sur sa production, sa criticité ne pourra qu'augmenter. A moins de redévelopper une filière industrielle européenne du tungstène issu d'une stratégie de long terme, la dépendance en ce métal ne sera que croissante. C'est pourquoi, les compagnies minières se focalisent à nouveau, depuis quelques années, sur des pays comme la France, l'Espagne, le Portugal ou le Royaume-Uni.

¹ Géologue, président de Phénix Ressources, thomas.poitrenaud@hotmail.fr



La dépendance aux métaux stratégiques : quelles solutions pour l'économie ?

Philippe Saint-Aubin
(ex rapporteur de l'avis du CESE sur les Métaux Stratégiques)

En 2019, le Conseil Economique Social et Environnemental a adopté le rapport « La dépendance aux métaux stratégiques : quelles solutions pour l'économie » suite à plusieurs mois d'audition de représentants de l'administration, de l'industrie, du monde de la recherche et de la société civile.

Ce rapport prône une politique basée sur les 7 piliers de l'économie circulaire définis par l'ADEME : consommation responsable, écoconception, écologie industrielle, économie de la fonctionnalité, réparation-réemploi, recyclage et approvisionnements durable. Il propose des mesures administratives, fiscales ou réglementaires au niveau national ou Européen pour avancer dans tous ces domaines.

Sur l'approvisionnement durable en particulier, il met en avant le besoin d'une diplomatie des matières premières, de la poursuite de recherche sans exploitation sur les ressources sous-marines. Enfin, tant en France métropolitaine qu'Outremer, il considère que l'exploitation minière terrestre ne doit pas être un tabou. Cependant, les mauvais exemples passés et les réticences des populations locales imposent au préalable une profonde réforme du Code Minier. Cette réforme a été initiée dans la loi 22 août 2021 « portant lutte contre le dérèglement climatique et le renforcement de la résilience face à ses effets », dite loi Climat. Le contenu détaillé de la réforme doit encore faire l'objet de décrets en Conseil d'Etat et surtout d'ordonnances avant fin 2022. Dans son avis le CESE liste les points à y intégrer: association des parties prenantes, définition des engagements environnementaux, articulation entre exploration et exploitation minière, expertise et débat public, adaptation à l'Outre-mer. Il préconise également de mettre à jour l'inventaire minier et de relancer les formations pluridisciplinaires en géologie et métallurgie.



Des terres si rares ?

Johann Tuduri ^{*1,2}, Nicolas Charles ¹, Gaétan Lefebvre

¹, Zineb Nabyl ², Fabrice Gaillard ², Olivier Pourret ³

¹ BRGM, F-45060 Orléans, France

² ISTO, UMR7327, Université d'Orléans, CNRS, BRGM, F-45071 Orléans, France

³ UniLaSalle, AGHYLE, F-60026 Beauvais, France

Les terres rares (REE) ont des propriétés magnétiques, électroniques, optiques et catalytiques exceptionnelles particulièrement utiles pour les technologies qui accompagnent la transition énergétique. Les secteurs d'utilisations des REE ont largement évolué depuis 2010, une période momentanée de restriction des exportations chinoises et de baisse de la consommation mondiale. Dès 2012, la consommation a repris, soutenue par le secteur des aimants permanents - type NdFeB - qui renferment notamment Nd et Pr et en moindre mesure Dy et Tb pour les applications de haute performance. Les secteurs d'usages de ces aimants sont multiples : moteurs électriques à très haut rendement où ils permettent la miniaturisation (électronique, robotique) et l'allègement des équipements (générateurs d'éoliennes off-shore, moteurs des véhicules électriques, etc.). Cette demande croît de 10 % par an. En 2018, la production mondiale est estimée à 145 000 t REE alors que la part de la Chine, selon les estimations, serait comprise entre 70 et 90 %.

La production des REE depuis la mine jusqu'aux aimants permanents est un avantage compétitif majeur de la Chine qui souligne l'importante vulnérabilité de l'approvisionnement pour l'industrie européenne. Afin d'atténuer ce déséquilibre industriel, l'UE encourage les États-membres à développer et à diversifier leurs sources d'approvisionnement, qu'elles soient primaires (minières) ou secondaires (réutilisation, recyclage et réduction des déchets). Cette dernière décennie a vu l'émergence d'un important marché de l'exploration des REE dont l'un des objectifs était de définir des ressources hors Chine. Si différents projets sont en cours de valorisation, nombre d'entre eux constituent des projets innovants car non- conventionnels et risqués économiquement.

Il s'agit ici de mettre en regard la demande croissante mondiale et européenne en REE avec les enjeux du développement du potentiel en REE du sous-sol européen. Une étude intégrée mêlant intelligence minérale des REE, métallogénie autour de l'énigme du fractionnement des carbonatites et de leur enrichissement en REE ainsi qu'une revue géologique inédite des gisements européens seront présentées.

Mots-Clés : Terres rares, utilisations, économie minérale, géologie, métallogénie, magmatisme alcalin



A PREY-PREDATOR DYNAMIC MODEL TO ESTIMATE THE FUTURE PRIMARY PRODUCTION OF METALS

Olivier Vidal

Isterre, CNRS, Université Grenoble-Alpes

The Paris Agreements (COP21) call for global carbon neutrality to be achieved by 2050. At this end, new infrastructures of energy production, storage, transport and use have to be built, which will consume vast amounts of raw materials. This move towards low-carbon energy must take place in a context of rapidly growing demand due to the economic emergence of populated countries, urbanization, and the development of new technologies. If current trends continue, we will need to produce until 2050 more metals than we have produced since antiquity, which raises the question of their availability. Some anticipate shortages in the course of the century, while others claim that technological evolution and recycling will make it possible to maintain the increase in production observed over the last century (3-5%/year). To go further on the question, we have built a dynamic model of metal primary production and recycling using a prey-predator dynamics. The model links the evolution of reserves, the quality of ore deposits, the energy of extraction, the industrial capital and the price of metals. It is able to reproduce the historical global data of copper production - a metal of crucial importance for the energy transition - since hundred years, and it provides insights on the future production until the end of the century for different assumptions of GDP/capita evolution that will control the future demand.



T5.3 Histoire des sciences de la Terre



Hommage de l'Algérie à un géologue au parcours exceptionnel : Louis Glangeaud

Djelloul Belhaï¹

¹ Laboratoire LGGIP, FSTGAT, USTHB, BP 32 El-Alia, Alger - Algérie

Louis Glangeaud est un géologue français qui a consacré sa vie à l'étude de tous les aspects de la géologie. Il s'est imposé par son travail et a réussi à fonder en Algérie une école de géologie dont le retentissement se fait toujours ressentir dans toutes les interprétations géodynamiques dans la chaîne atlasique d'Afrique du Nord, notamment dans sa partie tellienne.

Né le 14 juillet 1903 à Tulle (Corrèze), Louis-Hippolyte Glangeaud fils de Philippe Glangeaud et de Gabrielle Fonterbertasse, est décédé le 22 mars 1986 et a été inhumé à Clermont-Ferrand.

En 1924, il fut conseillé par son père le professeur et directeur de département de géologie de Clermont Ferrand Philippe Glangeaud pour entreprendre l'étude du Nord de la Province d'Alger qui offrait beaucoup de problèmes géologiques non résolus. Il obtint une bourse de Doctorat au Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris et devient collaborateur de la Carte géologique d'Algérie.

En 1925, il devient collaborateur auxiliaire au service de la carte géologique de France. La même année, il publia son premier article dans les Comptes rendus de l'Académie des Sciences *"sur l'existence de l'Aptien dans la région littorale de la province d'Alger et sur sa signification tectonique"* où il mit en évidence les flyschs et surtout les nappes qui faisaient l'objet de débats très controversés.

Il a publié 250 articles, dont 17 furent présentés avant sa soutenance de thèse de doctorat ès- sciences en 1932 intitulée « *Etude géologique de la région littorale de la Province d'Alger* ».

Ses connaissances dans toutes les disciplines de la géologie allant de la pétrographie à la stratigraphie, la paléontologie, la tectonique et même aux aspects de la géologie appliquée (hydrogéologie et géotechnique) et à la géophysique, tout cela est doublé d'une vision synthétique dans le domaine géodynamique font de lui à ce titre un homme qui mérite d'être regardé comme l'un des plus grands géologues français de tous les temps ayant travaillé en Algérie.

Résistant durant la Seconde Guerre mondiale, ce qui lui a valu d'être nommé Officier de la Légion d'honneur et d'obtenir la Croix du combattant volontaire de la Résistance et la Médaille commémorative des services volontaires dans la France libre.

Sur le plan scientifique, il a été lauréat de plusieurs prix prestigieux et il fut membre permanent de l'Académie des Sciences jusqu'à son décès.

Son empreinte sur la géologie algérienne reste indélébile au point que les nouvelles générations de géologues algériens le citent souvent dans leurs cours, travaux appliqués ou académiques.

Mots-Clés : Glangeaud, géologue, Tell algérien, nappe de flyschs, résistant, académicien.



Le Gros Caillou de la Croix-Rousse entre origine géologique, avancées scientifiques, histoire et mythologie, un exemple de géopatrimonialisation.

Maëla Lévine ^{*1}

¹ GeoMythoHumano (Youtube, Facebook)

Le gros Caillou de la Croix Rousse, un témoin géologique... mais pas seulement!

Sur les hauteurs en amont de la presqu'île de Lyon se trouve un large caillou devenu au fil des années le symbole de tout un quartier. Il s'agit du Gros Caillou de la Croix Rousse, bien connue des Lyonnais. Sa présence identifiée sur la colline depuis la fin du 19^{ème} siècle, ainsi que les nombreuses études scientifiques ayant débattu de ses origines glaciaires et de son parcours géologique, l'ont rendu familier. Mais le Gros Caillou ne se contente pas d'être un témoin de notre histoire géologique, et nous raconte bien plus...

Le Gros Caillou est intimement liée à la modernisation des pentes de la Croix Rousse. Les documents scientifiques datant de l'époque de sa découverte sont nombreux et nous permettent de mener une véritable enquête autour de son dégagement et aussi d'évoquer les zones d'ombre qui subsistent encore. Faisant le lien entre la science, l'histoire de la ville de Lyon et ses habitants, le Gros Caillou permet également de revenir sur les mécanismes de développement des connaissances scientifiques en géologie et de leur communication auprès du public. Sa conservation en tant qu'élément du paysage urbain fait de lui un objet patrimonial incontournable dont s'est emparé le peuple Lyonnais en créant un conte ancré dans la culture populaire lyonnaise : la légende du Gros Caillou de la Croix Rousse. Cette appropriation culturelle permet de se questionner sur la perception que l'homme a de son environnement naturel géologique.

Si les connaissances purement scientifiques de cet échantillon d'histoire ont peu à peu évoluées au profit du développement de sa dimension culturelle et identitaire, la reconnaissance sociale de ce géopatrimoine est le témoin de la connexion que la population entretient avec son environnement et de l'importance qui est accordée au maintien de la mémoire collective et de sa transmission aux générations futures.

Le Gros Caillou de la Croix-Rousse, un objet géologique que je vous invite à découvrir ou redécouvrir au travers de son processus de patrimonialisation !

Mots-Clés : Gros Caillou, Croix-Rousse, géopatrimoine, légende, patrimonialisation, culture, communication



T5.3.1 Aléas et risques naturels



Le lac d'Aiguebelette, une archive de la sismicité dans les Alpes françaises depuis la dernière période glaciaire

Banjan Mathilde ^{*1,3}, Crouzet Christian¹, Sabatier Pierre², Jomard Hervé³, Demory Francois⁴, Develle Anne-Lise², Jenny Jean-Philippe⁵, Messenger Erwan²

¹Université Savoie Mont Blanc, Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, IFFSTAR, ISTERRE, Chambéry, France

²Université Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, EDYTEM, Chambéry, France

³IRSN - Bureau d'évaluation des risques sismiques pour la sûreté des installations, Fontenay-aux-Roses, France

⁴Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, Coll France, CEREGE, Aix-en-Provence, France

⁵Université Savoie Mont Blanc, INRAE, CARTEL, Thonon-les-Bains, France

Le calcul de l'aléa sismique se fonde sur le postulat d'une sismicité stable dans le temps, c'est-à-dire que ce que nous avons vécu dans le passé est considéré comme un indicateur fiable de ce que nous vivrons demain. Il est donc indispensable de reconstruire la sismicité sur le long terme pour discuter régionalement de cette hypothèse.

Depuis le XVe siècle, plus de vingt séismes d'intensité épicentrale supérieure à VII sont identifiés au sein de la base de données Sisfrance dans la région Rhône-Alpes. Des études menées sur des séquences sédimentaires lacustres du lac d'Annecy et du lac du Bourget ont mis en évidence la capacité de ces « archives » à enregistrer une activité sismique récurrente, avec un potentiel événement sismique majeur identifié vers 9900 cal. BP. Ces archives lacustres sont essentielles pour mieux appréhender 1) l'occurrence des événements sismiques majeurs avec un temps de retour long, 2) l'évolution de la récurrence des événements sismiques sur le long terme, antérieurs aux enregistrements historiques et instrumentaux. Le Jura méridional est une zone sismiquement active, comme en témoigne de nombreux événements sismiques et la présence de plusieurs failles actives. Nous présentons ici les résultats de l'étude de deux séquences sédimentaires complètes de 11 et 16 mètres de long ayant été respectivement extraites de la fosse la plus profonde (-71m vertical datum: surface dulac (v.d.l.)) et moins profonde (-30m v.d.l.) du lac d'Aiguebelette. Pour étudier les modalités d'enregistrement de la sismicité dans ce lac, nous avons suivi une approche multi-proxy basée sur des analyses sédimentologiques, géochimiques et paléomagnétiques combinées à une analyse de profils sismiques et des datations au radiocarbone. Les analyses multi-proxy permettent une identification quantitative de dépôts instantanés intercalés dans la sédimentation continue varvée (période Holocène). Dans la séquence extraite de la fosse profonde, 33 homogénites sont identifiées, caractérisées par une foliation élevée de l'anisotropie de susceptibilité magnétique (>2%) et de faibles amplitudes de champs ($\leq 0.4 \mu T$), équivalent à une faible aimantation rémanente isotherme. Ces dépôts sont généralement associés à l'effet de seiche dans la colonne d'eau, induit par un séisme.

Dans chaque bassin, trois de ces dépôts sont synchrones et datés à 3000 ± 100 , 6900 ± 100 et 11400 ± 300 cal. BP. Ces événements semblent également correspondre à des dépôts, observés dans les Alpes suisses centrales, interprétés comme la conséquence de grands séismes holocènes. À Aiguebelette, l'événement le plus ancien et le plus épais enregistré se trouve à la transition entre le Tardiglaciaire et l'Holocène. Dans le bassin profond, ce dépôt est composé d'une homogénite d'un mètre d'épaisseur surmontant une base granoclassée. L'interprétation des profils sismiques haute résolution indique que ce dépôt correspond à un faciès sismique transparent. Dans les lacs du Bourget et d'Annecy, des profils sismiques antérieurement acquis montrent également des faciès transparents interprétés comme des dépôts instantanés se produisant au voisinage de la limite Tardiglaciaire - Holocène.

Une meilleure connaissance des mécanismes sédimentaires produisant les dépôts instantanés est encore nécessaire afin de déconvoluer les forçages climatiques, anthropiques et tectoniques sur l'activité sismique enregistrée dans le lac d'Aiguebelette.

Mots-Clés : Sédimentologie, lacustre, homogénites, paleo-séismes, sismicité, Holocène, Tardiglaciaire



Évaluation du risque inondation à l'échelle de la parcelle à l'aide d'un modèle numérique de terrain haute résolution et d'un modèle hydraulique

Cécile Baudement ^{*1,2}, Théo Mammet ^{1,2}, Quentin Barbier ¹, Vincent Cappoen ^{1,2},

¹ Geolithe - France

² HydroPhy - Groupe Geolithe - France

Le risque inondation est traité par le Plan de Prévention des Risques (PPR), qui est un outil réglementaire dans l'aménagement du territoire. D'après l'évaluation préliminaire du risque inondation (EPRI) de 2011, près de 17 millions de français sont exposés aux risques inondation tels que le débordement de cours d'eau, la submersion marine, la remontée de nappe phréatique, le ruissellement sur les versants lors d'événements pluvieux ainsi que le ruissellement pluvial en milieu urbain. Quel que soit le risque inondation, en l'absence de Plan de Prévention du Risque Inondation (PPRI), il est nécessaire de cartographier l'extension spatiale de ce risque à l'aide d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) et d'un modèle hydraulique.

Une préoccupation majeure des hydrologues sur ce type de problématique est l'estimation des débits d'un bassin versant, urbain ou naturel, non jaugé. Pour des études à l'échelle de la parcelle, très peu de mesures de débit sont disponibles. La méthode rationnelle de calcul du débit d'apport du bassin versant est alors généralement utilisée. Elle consiste à connaître l'aire du bassin versant, l'intensité de la pluie centennale, le temps de concentration ainsi que le coefficient de ruissellement.

Les cartes d'aléa inondation disponibles en libre accès sont généralement créées sur la base de la BD-Alti de l'IGN (25, 75, 250m). À l'échelle de la parcelle, ce MNT n'est pas adapté. L'apport de MNT à haute résolution (0.1 m) et à l'échelle de la parcelle a été testé sur un cas d'étude. Deux modèles hydrauliques, basés sur la méthode des volumes finis, ont été réalisés et les cartes du risque inondation selon chaque MNT ont été comparées.

Le calcul des débits d'apport par la méthode rationnelle combiné à un MNT haute résolution est un outil performant pour limiter les incertitudes en tenant compte du relief sous couvert (zone boisée et urbanisée) et permettre de mieux gérer les zones constructibles pour les collectivités locales et les particuliers.

Mots-Clés : Risque inondation, débits, modèle numérique de terrain (MNT), modélisation hydraulique, volumes finis.



CIEST² : Cellule d'Intervention et d'Expertise Scientifique et Technique dans le cadre des aléas géologiques.

Etienne Berthier¹, Marcello De Michele², Simon Gascoin⁴, Mathieu Gouhier⁵,
 Raphaël Grandin^{3*}, Romain Jolivet⁶, Yann Klinger³, Pascal Lacroix⁷, Jean-Philippe
 Malet⁸, Emilie Ostanciaux³, Virginie Pinel⁷, Elisabeth Pointal³, Catherine Proy⁹,
 Claire Tinel⁹

¹ OMP-LEGOS - France

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

³ Université de Paris, Institut de physique du globe de Paris, CNRS, F-75005 Paris – France

⁴ Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO) – France

⁵ OPGC – France

⁶ Ecole Normale Supérieure (ENS) – France

⁷ Université Grenoble Alpes, Université Savoie Mont-Blanc, CNRS, IRD, Université Gustave Eiffel, ISTerre, Grenoble, France

⁸ Ecole et Observatoire des sciences de la Terre (EOST) – France

⁹ Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) – France

Le dispositif de la CIEST avait été créé en France en 2005 via une convention entre six organismes nationaux (BRGM, CEA, IGP, IRD, UCBL). L'objectif était d'étendre l'utilisation des moyens spatiaux, et en particulier les images SPOT acquises dans le cadre de la Charte Internationale « Espace et Catastrophes Majeures », pour la compréhension et l'étude des aléas géologiques.

Depuis 2019, l'initiative a été relancée par ForM@Ter, pôle national de données et de services dédié à la Terre solide, et le CNES (Centre Nationale d'Etudes Spatiales) dans le but de stimuler le partage et la diffusion des résultats obtenus à partir des données haute résolution Pléiades stéréo fournis par le CNES. La CIEST², nouvelle génération de la CIEST, a pour objectif de programmer en urgence des données satellite optiques et de générer des cartes de déplacement ou des informations de changement de masse en cas d'aléa géophysique, tels que les séismes majeurs, les phases d'éruption volcaniques, ou les effondrements gravitaires. Depuis début 2021, le processus est accéléré par la connexion avec le service DSM, de calcul à la demande de Modèle numérique de Surface développé et opéré par ForM@Ter sur l'infrastructure de calcul Unistra-EOST/A2S à partir des données Pléiades fournies par le CNES.

Cette intervention permettra de présenter l'organisation et le fonctionnement de ce dispositif en précisant dans quelles conditions il peut être activé. Elle permettra également de partager des exemples d'application et de succès à l'image des travaux réalisés dans le cadre de l'éruption de la Soufrière de Saint Vincent (9-18 avril 2021), dans l'étude de l'érosion et des mouvements de terrain provoqués par la tempête Alex (2-3 octobre 2020) dans la vallée de la Vésubie en France, le suivi de l'effondrement d'un glacier en Inde (7 février 2021) ou encore pour la caractérisation des ruptures de surface engendrées par le tremblement de terre de Maduo en Chine (21 mai 2021).

Mots-Clés : Aléas géologiques, données Pléiades, données satellitaires



Tsunamis et surcotes de tempêtes : enregistrements sédimentaires discrets

Eric Chaumillon^{*1}, Briec Riou¹, Juliette Baumann¹, Jean-Luc Schneider², Pierre Sabatier³ et Catherine Chagué⁴.

¹ : UMR CNRS 7266 LIENSs Littoral Environnement et Sociétés, La Rochelle Université.

² : UMR CNRS 5805 EPOC Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux, Université de Bordeaux.

³ : UMR CNRS 5204 EDYTEM Environnements Dynamiques Territoires Montagne, Université de Chambéry.

⁴ : University of New South Wales (UNSW), Sydney, Australia.

Les submersions marines, qu'elles soient induites par les tsunamis ou les tempêtes, sont les aléas parmi les plus dévastateurs, engendrant des centaines de milliers de morts. Cet état de fait, combiné à une littoralisation croissante des sociétés, implique d'établir de meilleures chroniques des événements passés, afin de renseigner les périodes de retour et les événements paroxysmaux de référence. Dans ce contexte les archives géologiques sont essentielles. Des progrès importants ont été réalisés ces dernières années pour identifier les traces des submersions marines dans les sédiments. Les sites littoraux les plus favorables sont généralement des secteurs abrités dans lesquels les submersions marines induisent une hausse brutale de l'énergie hydrodynamique, enregistrée par une augmentation de la granularité des sédiments. Mais qu'en est-il des systèmes côtiers où les sédiments sont fins et homogènes ? C'est à partir de deux exemples récemment publiés, dans le sud-ouest de la France (Charente-Maritime) et le sud-ouest du Pacifique (Samoa américaines), impliquant respectivement des submersions par tempêtes (Xynthia, 2010, Martin, 1999) et tsunamis (2009 South Pacific Tsunami et 1960 Great Chilean Earthquake Tsunami) que nous montrerons des enregistrements plus subtils de ces événements catastrophiques.



Grande rupture de versant rocheux dominant le village d'Argentière (massif des Aiguilles Rouges) – Résultats préliminaires

Léa Courtial-Manent^{*1,2}, Jean-Louis Mugnier^{2,3}, Swann Zerathe^{2,6}, Julien Carcaillet^{2,3}, Lucas Tavernier^{4,2}, Pauline André^{4,2}, Riccardo Vassallo^{4,2}, Ludovic Ravanel^{5,3}, Marie- Pierre Doin^{2,3}, Jean-François Buoncristiani⁷

¹ Université Grenoble Alpes – France ; ² Institut des Sciences de la Terre- France ; ³ CNRS – France ; ⁴ Université Savoie Mont Blanc – France ; ⁵ EDYTEM – France ; ⁶ IRD – France ; ⁷ Biogéosciences, Dijon – France

Les grandes ruptures de versants rocheux correspondent à des instabilités gravitaires de grande ampleur dont la mise en mouvement ou la réactivation sont généralement liées à des facteurs multiples (séismes, précipitations, décompression à la suite de la fonte des glaciers, etc.). Nous avons mis en évidence une telle rupture gravitaire d'ampleur kilométrique dans le massif des Aiguilles Rouges (Chamonix, France).

Une étude concernant la géométrie des failles actives dans la prolongation de la faille de Vallorcine et des ruptures de versant a été réalisée à partir d'un MNT LiDAR de résolution métrique. Ces ruptures de versants ont été cartographiées et parcourues sur le terrain. Le mouvement atteint la dizaine de mètres avec à la fois une composante en ouverture et une composante en glissement vers l'aval.

Pour préciser les éléments chronologiques – initiation, évolution du déplacement au cours du temps, nous avons échantillonné le long de l'escarpement associé au sommet de la rupture afin d'utiliser la méthode des isotopes cosmogéniques. Nous nous sommes intéressés aux concentrations en ¹⁰Be. Leur analyse montre une initiation et une activité entre ~2000 et 600 ans avant la période actuelle.

La fraîcheur de certains affleurements suggère une activité subactuelle de cette rupture, ce qui est en accord avec les champs de déplacements estimés par série temporelle InSAR réalisée à partir d'environ 130 acquisitions Sentinel-1 et 800 interférogrammes sur les Alpes occidentales. Une étude basée sur des mesures extensométriques est en cours de réalisation et permettra de conforter ou d'infirmer une telle hypothèse.

Enfin, une étude du risque associé aux blocs découpés à l'intersection entre couloirs et grandes ruptures de versant a été effectuée en utilisant le logiciel RAMMS (Rapid MassMovement System). Cela nous a permis de simuler la chute de blocs et leur trajectoire possible, leur énergie durant la phase de chute et la position finale qu'ils pourraient atteindre.

Ces premiers résultats montrent un fonctionnement de la rupture largement postérieur à la décompression du versant (~17 ka) et une relation génétique avec la faille active de la

« Remuaz ».

Mots-Clés : Risque gravitaire, MNT haute résolution, isotopes cosmogéniques, mesures mouvements actuels



Evaluation de la sécheresse dans la région de Marrakech-Safi à l'aide de SIG et la télédétection.

Chaima Elair^{*1}, Khalid Rkha Chaham¹, Abdessamad Hadri²

¹ DLGR – Laboratoire de Dynamique de la Lithosphère et Genèse des Ressources - Faculté des sciences Semlalia, Marrakech-Maroc

² Bureau d'études des ressources ingénierie RESING, 40000 Marrakech, Maroc

Au cours de ces dernières décennies, le Maroc a connu des événements de sécheresse de plus en plus fréquents et intenses. Ce phénomène est l'un des effets majeurs du changement climatique au niveau de l'ensemble de la région méditerranéenne, affectant à la fois le volume et la répartition spatio-temporelle des précipitations, l'humidité du sol, le stockage des eaux souterraines et le pouvoir évaporant de l'air. La gestion de cet aléa consiste notamment à développer des outils performants et fiables pour la prévision, la compréhension et la gestion de la sécheresse afin de concevoir des stratégies appropriées de résilience.

Le présent travail porte sur la caractérisation de l'intensité et de la fréquence de la sécheresse dans la région de Marrakech-Safi. Région située au centre du royaume et qui se caractérise par son climat aride à semi-aride, induisant une rareté de la ressource en eau. L'approche consiste d'abord à rassembler et synthétiser les données disponibles, puis cerner l'historique et l'évolution de cet aléa à travers l'utilisation des données pluviométriques mensuelles qui ont été fournies par l'agence de bassin hydraulique de Tensift (ABHT), l'agence de bassin hydraulique d'Oum Er-Rbia (ABHOER), ainsi que les données de télédétection mensuelles du satellite TERRA/AQUA avec son capteur MODIS pour la période de 2000 à 2018. Ceci permet une bonne surveillance spatiale et temporelle de la sécheresse via différents indices : SPI (Indice Standardisé de Précipitation) à différentes échelles de temps (1, 3, 6, 12 mois), VCI (Indice d'état de la Végétation), TCI (Indice de Condition de Température) et l'indice VHI (qui caractérise la santé globale de la végétation).

Le travail a permis de dresser une zonéographie de la sécheresse dans la région étudiée avec notamment la délimitation de quatre zones à degrés différents de sécheresse (extrême, sévère, modérée ou légère), de bien cerner l'historique des sécheresses durant la période étudiée et de montrer la performance de ces indices en termes de compréhension de l'influence de la sécheresse météorologique sur la végétation.

Mots-Clés : Sécheresse, SIG, télédétection, SPI, VCI, TCI, VHI



Active subaquatic fault segments in Lake Iznik along the middle strand of the North Anatolian Fault, NW Turkey

Renaldo Gastineau^{*1,2}, Julia de Sigoyer¹, Pierre Sabatier², Stefano C. Fabbri³, Flavio S. Anselmetti³, Anne-Lise Develle², Mustafa Şahin⁴, Serkan Gündüz⁴, Frank Niessen⁵ and A. Catalina Gebhardt⁵

¹ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, ISTerre, 38000 Grenoble, France

² EDYTEM, Université Savoie Mont-Blanc, Université Grenoble Alpes, CNRS, Le Bourget du Lac, France

³ Institute of Geological Sciences and Oeschger Centre for Climate Change Research, University of Bern, Baltzerstrasse 1+3, 3012 Bern, Switzerland

⁴ Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Arkeoloji Bölümü, Görükle, Bursa, Turkey.

⁵ Alfred Wegener Institute (AWI) Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, D-27568, Bremerhaven, Germany

Lake Iznik (NW Turkey), is bordered by the middle strand of the North Anatolian Fault (MNAF), whose seismic activity is debated because of its quiescence during the instrumental period. In contrast, significant historical activity is documented by several chronicles over the last two millennia.

This study aims to get a new insight into its long-term seismicity and its tectonic setting. Lacustrine sediment cores reveal fourteen earthquake-induced turbidites since their ages correspond to seismic events during the past two millennia. Bathymetry and high-resolution seismic reflection data allow describing two hitherto unknown subaquatic active fault structures (the South Boyalica and Iznik faults), belonging to the MNAF system. Sediment cores sampled on both sides of the Iznik Fault document an event deposit and a sedimentary unit vertically offset of ~40 cm interpreted as the last rupture during the 1065 CE destructive earthquake. Older events are supposed on this fault more than a thousand years ago. Further studies will help to estimate the horizontal coseismic offset of this oblique-slip fault and the calendar of older ruptures. The current seismic gap of thousand years on this segment greatly increases the seismic hazard in this region and must be considered in the seismic risk assessment of the NAF system.

Keywords: North Anatolian Fault, Lake sediment, Fault activity, Earthquake, Turbidite, Paleo-seismicity.



Conceptualisation des processus dans le déclenchement d'instabilités gravitaires sur la côte rocheuse basque française

Lucie Guillen^{1-2*}, Yannick Thiery¹, Thomas Dewez¹, Clara Levy¹, Pierre Bourbon³,
Séverine Caritg¹, Lisa Martins¹⁻⁴, Philippe Razin⁵, Christophe Garnier³, Alessia
Cucurrullo², Domenico Gallipoli⁶

¹ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Orléans, France

² Laboratoire des Sciences pour l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie Électrique (SIAME),
Université de Pau et des Pays de l'Adour – Pau, France

³ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Pessac, France

⁴ Université Paris I Panthéon-Sorbonne – Paris, France

⁵ École Nationale Supérieure en Environnement, Géoresources et Ingénierie du Développement
Durable (ENSEGID) – Bordeaux, France

⁶ Università degli Studi di Genova – Genoa, Italy

L'érosion des falaises littorales par instabilités gravitaires constitue une menace pour la sécurité des personnes et des biens ; cette problématique est particulièrement d'actualité sur la côte basque française. Dans le cadre de la gestion du risque et afin de pouvoir prendre les décisions les plus appropriées aux différents contextes de cette côte, il faut dans un premier temps comprendre les processus qui régissent cette érosion.

La particularité des falaises littorales basques réside dans leur forte diversité géomorphologique et géologique sur un linéaire de 40 km. Les instabilités qui y surviennent sont de typologies variées et impliquent différents facteurs de prédisposition et de déclenchement dont les mécanismes et la temporalité sont mal connus. Afin de caractériser ces phénomènes, le projet FEDER EZPONDA concentre ses investigations sur deux sites pilotes : Bidart et Socoa. Le site de Bidart présente des falaises d'alternances marno-calcaires surmontées d'une couverture sédimentaire détritique et sont déstabilisées par des coulées, des glissements coulées et des glissements rocheux. Le site de Socoa, est constitué de flyschs ouverts par des cavités ; elles sont le lieu de chutes de blocs, de ruptures par flambement et de glissements rocheux banc sur banc.

L'objectif de cette présentation est de proposer des schémas conceptuels des différentes instabilités gravitaires, rendant compte des processus impliqués sur la côte basque française. La compréhension de ces phénomènes permettra d'ouvrir une réflexion sur leurs facteurs de prédisposition, de déclenchement et sur leur rythmicité, pour affiner la typologie « mouvements de terrain » de la côte basque française.

Les instabilités seront analysées qualitativement par télédétection optique et à partir d'observations in situ. Ces résultats seront confrontés au modèle litho-structural GeoModeller en cours d'élaboration afin de contraindre l'implication des facteurs de prédisposition des instabilités observées.

Mots-Clés : Instabilité gravitaire, érosion, littoral, côte basque, schéma conceptuel, typologie, GeoModeller, Ezponda



Gas detection and quantification using iXblue Echoes high-resolution sub-bottom profiler and Seapix 3D multibeam echosounder from the Laacher See (Eifel crater lake)

Guillaume Jouve^{1*}, Corentin Caudron², Guillaume Matte¹

¹iXblue Sonar Systems Division, France

²ISTerre, Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, France

Gases are most often driving volcanic and limnic eruptions. Contrary to atmosphere, CO₂ bubbles are easily detected in water column, particularly using hydroacoustic methods (Vandemeulebrouck et al., 2000). Two pioneering studies have monitored gas venting into Kelud Crater Lake (Indonesia) from a hydroacoustic station shortly before volcanic eruptions in 1990 (Vandemeulebrouck et al., 2000) and 2007 (Caudron et al., 2012); the later allowing to empirically quantify CO₂ fluxes by acoustic measurements. However, despite hydroacoustic detection capabilities, fundamental advances are limited by technology performances. Quantification remains complex due to the 3D structure of clouds and acoustic interactions between bubbles. It is thus necessary to accurately map bubble clouds, to monitor their evolution and possibly to dissociate different gas origins to reduce volcanic risk, which is major in aqueous environments. Here, we present preliminary results from near-surface geophysics of sedimentary deposits and water column gas distributions and quantification at the Laacher See (Eifel, Germany), using Echoes high-resolution sub-bottom profiler and iXblue Seapix 3D multibeam echosounder, respectively. Backscatter profiles of elements in the water column allow to distinguish fish and gas bubbles and highlight several concentrated collocation of bubble plumes. Ongoing research on the Target Strength (TS) of bubbles suggest they are of very small size (~35 µm), which would explain why, in the same spot, we did not observe gas bubbles using camera mounted on ROV. This also raises new perspectives to improve CO₂ budget modeling from volcanic bubbles release. Meanwhile, the Echoes 10 000 provide more than 40 m of penetration with an 8 cm-resolution, and reveal paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction perspectives, 3D modeling of remobilized materials and tephra deposits from volcanic activity, as well as gas diffusion through the sediment. Our geophysical scientific approach contributes to a wider scientific effort to improve forecasting of volcanic and limnic eruptions and participates to improve early warning systems by constant collaborations with academic research.

Bibliography:

- Vandemeulebrouck et al (2000) J. Volcanol. Geotherm. Res 97, 1-4: 443-456
- Caudron et al (2012) JGR: Solid Earth 117, B5

Mots-Clés : hydroacoustic, volcanic eruption, gas bubbles, backscatter, seismic reflexion, paleoenvironment



Cartographie de l'aléa 'mouvements de terrain' en Nouvelle-Calédonie par méthode quantitative

Yannick Thiery^{1*}, Bastien Colas², Yaël Guyomard³, Mathieu Mengin³, Rosalie Vandromme¹, Olivier Monge³, Vincent Mardhel⁴

¹ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Orléans, France

² Bureau de Recherches Géologiques et minières (BRGM) – Montpellier, France

³ Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Energie de la Nouvelle-Calédonie (DIMENC) – Nouméa, Nouvelle- Calédonie

⁴ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Nouméa, Nouvelle-Calédonie

Le territoire montagneux de la Nouvelle-Calédonie est régulièrement affectée par des phénomènes de 'mouvements de terrain' (i.e. glissements de terrain, chutes de blocs, laves torrentielles) à la faveur d'épisodes pluvieux intenses. Les conséquences peuvent être matérielles et humaines, comme en 2016, sur la commune de Houaïlou. Actuellement, l'aléa 'mouvements de terrain' à l'échelle du pays est insuffisamment évalué et pris en compte dans l'aménagement du territoire. En 2019, une collaboration entre service géologique de la DIMENC et le BRGM prévoit l'élaboration d'une méthodologie à l'échelle du 1 :25 000^{ème} pour évaluer les aléas 'mouvements de terrain' selon les recommandations du JTC1. Elle est quantitative, tenant compte de la susceptibilité du territoire (probabilité spatiale d'occurrence des phénomènes), de la probabilité temporelle d'occurrence (à partir d'analyses diachroniques) et de l'intensité des phénomènes (i.e. propagation des événements). La méthodologie est déclinée par type de phénomène et fondée sur un inventaire très consistant. Elle est déclinée en cinq étapes:

1. Inventaire des événements par télédétection et observations de terrain;
2. Cartographie affinée du régolithe : altérites et dépôts gravitaires ;
3. Calcul de la susceptibilité par une méthode bivariée ;
4. Calcul de la propagation des phénomènes par approche numérique et de leur probabilité temporelle d'occurrence ;
5. Intégration de l'intensité des phénomènes selon les volumes ou les vitesses estimées.

Les classes de probabilités spatiales et temporelles retenues sont celles élaborées par le JTC-1. Le croisement de ces informations permet d'obtenir des cartes d'aléas quantifiées. La validation des résultats est réalisée avec des phénomènes non pris en compte pour les calculs et par une validation de terrain. La méthode est testée sur la commune du Mont-Dore (643 km²), fortement impactée en 1988 lors du passage du cyclone 'Anne'. Elle sera applicable sur tout le territoire.

Mots-Clés : mouvements de terrain, cartographie d'aléa, méthode quantitative, probabilité, intensité, régolithe, Nouvelle-Calédonie



T5.3.2 Activités anthropiques et contaminations environnementales



Étude préliminaire des retombées de poussières industrielles sur les sols de Gravelines (Hauts-de-France)

Marine Casetta^{*1}, Jacinthe Caillaud¹, Sylvie Philippe¹, Lucie Courcot¹, Vincent Cornille¹, Michael Hermoso¹

¹Univ. Littoral Côte d'Opale, CNRS, Univ. Lille, UMR 8187 - LOG - Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, France

Les problématiques sanitaires et environnementales liées aux émissions de polluants industriels sont historiquement ancrées dans la région Hauts-de-France. La réduction de ces émissions constitue des enjeux sociétaux, éthiques et économiques grandissants.

Sur le secteur Dunkerquois sont implantées plusieurs industries métallurgiques et sidérurgiques, dont les activités génèrent des poussières dites « sédimentables » (diamètre supérieur à 20 μm). Contrairement aux poussières fines potentiellement présentes dans l'air ambiant (diamètre inférieur à 10 μm), elles ne peuvent pénétrer profondément le système respiratoire et ont tendance à s'envoler pour se redéposer plus loin sur le substrat.

Lorsque les vents soufflent du Nord-Est, les poussières riches en métaux issues de ces industries sont mobilisées et sédimentent particulièrement sur la ville de Gravelines. Bords de fenêtres, mobilier de jardin ou encore potagers des citoyens réceptionnent alors ces dépôts. La présente étude a pour objectif de déterminer l'impact et le devenir de ces poussières industrielles une fois déposées sur les sols. Plusieurs campagnes de prélèvements superficiels (1 à 5 cm) ont été réalisées afin d'étudier une éventuelle contamination par ces particules anthropiques (analyses par fluorescence de rayons X, MEB EDX, ...) en lien avec la nature des substrats pédologiques (granulométrie, teneurs en carbonates, matière organique etc ...).

Cette première caractérisation permet la cartographie des zones impactées par les retombées, ainsi que leur degré de vulnérabilité. Les résultats sur les échantillons de Gravelines sont comparés à ceux obtenus sur la Réserve Naturelle Nationale du Platier d'Oye, site témoin localisé en dehors du couloir des vents de NE.

Il s'agit de la première étape avant de cibler et d'étudier, par des prélèvements plus profonds (20 cm), les interactions et le comportement (à long terme) des poussières industrielles au sein des matrices pédologiques.

Mots-Clés : Poussières sédimentables, industries métallurgiques, contamination des sols, Dunkerquois.





Impact des fluctuations du niveau d'une nappe phréatique induites par les changements climatiques sur la remobilisation des hydrocarbures pétroliers raffinés légers (LNAPLs)

Amélie Cavelan ^{*1}, Fabrice Golfier ², Stéfan Colombano ³, Noële Enjelvin ⁴, Hossein Davarzani ³, Jacques Deparis ³, Pierre Faure ¹

¹ Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux (LIEC) – CNRS : UMR 7360, Université de Lorraine - France

² GeoRessources – CNRS : UMR 7359, Université de Lorraine - France

³ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

⁴ Laboratoire Sols et Environnement (LSE)– INRA : UMR 1120, Université de Lorraine – France

Ce travail est en partie financé par le projet DEEPSURF “Lorraine Université d’Excellence”, ANR-15-IDEX-04- LUE.”

Les LNAPLs (Light NonAqueous Phase Liquid) sont une source importante de contamination des sols. Lorsqu’ils migrent dans la zone non saturée, une partie des LNAPLs reste piégée par capillarité. D’autres, accumulés au toit de la nappe, génèrent sur le long terme un panache. Les variations saisonnières du niveau piézométrique entraînent une dispersion verticale importante de ces contaminants au niveau de la frange capillaire, favorisant leur propagation dans l’eau et l’atmosphère. Le GIEC prédit une intensification de ces variations piézométriques durant le prochain siècle en raison des variations d’intensité des précipitations (liées au changement climatique) et de l’utilisation croissante des ressources en eau. Dans ce contexte qui pourrait fortement impacter la remobilisation des LNAPLs, il est primordial de mieux comprendre l’impact des variations piézométriques sur les mécanismes de relargage des hydrocarbures. La mise en place d’un dispositif expérimental original couplant des mesures géophysiques indirectes (mesures de la conductivité électrique), physico-chimiques *in situ* (pH, Eh, température) et géochimiques permettra d’évaluer et de comparer la nature et la quantité des rejets de LNAPL au cours des fluctuations du niveau piézométrique entre deux systèmes expérimentaux contaminés : l’un soumis à un climat ‘normal’ basé sur les chroniques climatiques régionales, l’autre basé sur le scénario le plus extrême du GIEC. Cette étude sera conduite à différentes échelles (colonnes décimétriques de laboratoire et lysimètres de 2 m³) et sur des aquifères de différente complexité géologique. Les hydrocarbures mobilisés seront collectés via des bougies poreuses et des chambres de collecte de gaz et régulièrement analysés (GC-MS, IRTF). La complémentarité des différentes méthodes de monitoring du LNAPL seront comparées et des simulations numériques de l’écoulement et du transport du LNAPL seront réalisées afin d’identifier les mécanismes de remobilisation des contaminants.

Mots-Clés : eaux souterraines, LNAPL, niveau piézométrique, changements climatiques



Impact of tailings on Environment: example of the weathering of schist constituting spoil tips in the North of France

Pauline Claisse ^{1*}, Franck Bourdelle¹, Emily Lloret¹

1 : Univ. Lille, Institut Mines-Télécom, Univ. Artois, Junia, ULR 4515 – LGCgE, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, F-59000 Lille, France

The subsoil exploitation has strong impacts on ecosystems especially through the generation of large amounts of waste which can lead to the release of potentially polluting elements into the surrounding environment. The North of France is particularly concerned because the region holds one of the largest coal mining area in the country. The inherited visible scars of this past extraction are the 339 inventoried spoil tips, mainly made of carboniferous schists and scoria. These schists come from carboniferous units located at a depth of 100 to 700 m, and were placed in contact with the atmosphere, hydrosphere and biosphere following the coal extraction. Consequently, they are subject to disintegration and weathering processes, as the first stage of element transfers. In this context, the fine characterization and the quantification of these weathering processes become essential.

For that, we performed a mineralogical and geochemical study of the schist and its alteration front, using optical microscopy, high-resolution electron microscopy (SEM, TEM on FIB sections), and X-ray diffraction (XRD). Schist samples from different spoil tips exhibit ochre alteration fronts composed by clay minerals (illite, kaolinite), jarosite and iron oxides. In fact, these fronts consist of two superimposed layers of $\approx 10 \mu\text{m}$ thickness, one enriched in iron and made of oxides and clays, and one enriched in sulfur and iron, mixing of sometimes-well-crystallized jarosite, oxides, residual quartz and clays. Fractures crossing the schist are also filled with iron oxides, but without jarosite. This indicates that S and Fe can be easily transferred from the schist toward the environment, similarly to common acid mine drainage, but that varying conditions can influence the involved processes. Even if the formation of a jarosite-rich layer around the schist contributes to the development of an acidic neo-soil at the spoil tip surface, it can fix heavy metals and limit the element transfers.

Mots-Clés : tailings/spoil tips, schist weathering, sulfur, iron



Evaluation des tendances de contamination dans les eaux de surface : pertinence de l'échantillonnage des matières en suspension

Marina Coquery, Anice Yari, Jérôme Le Coz, Aymeric Dabrin

UR RiverLy, INRAE – France

Les directives européennes imposent à chaque État membre de surveiller la contamination des sédiments continentaux et de s'assurer que les concentrations de contaminants organiques hydrophobes et de métaux traces dans les sédiments n'augmentent pas de manière significative avec le temps. En France, les Agences de l'Eau ne disposent pas de méthodologie adaptée pour interpréter correctement les données de surveillance de la contamination des sédiments. La principale difficulté opérationnelle pour comparer les données de contamination des sédiments de surface d'une année sur l'autre est la variabilité naturelle des sédiments (comme la taille des particules qui contrôle partiellement la variabilité des concentrations de contaminants) et l'hétérogénéité des dépôts, qui dépendent notamment des conditions hydrologiques. Ainsi, l'échantillonnage des matières en suspension (MES) qui cible les particules de petites tailles (généralement $< 200 \mu\text{m}$) représente une alternative prometteuse à la surveillance des sédiments de surface.

Pour démontrer cette hypothèse, nous avons évalué les tendances temporelles de contamination en utilisant les concentrations de plusieurs contaminants (éléments traces et hydrocarbures aromatiques polycycliques) mesurées dans les sédiments de surface et les MES (prélevés par centrifugation à flux continu) fournies par les Agences de l'Eau à partir de leurs programmes de surveillance. L'analyse des tendances (à l'aide du logiciel Hype) a mis en évidence la pertinence de l'utilisation de l'échantillonnage des MES par rapport à la surveillance des sédiments, notamment en raison de la plus grande homogénéité des particules échantillonnées. Les MES permettent une meilleure détection des tendances temporelles malgré un nombre limité d'échantillons, et évite la mise en œuvre d'une étape critique de normalisation des concentrations (par exemple en utilisant le fer ou l'aluminium pour les métaux) souvent nécessaire pour les sédiments de surface.

Mots-Clés : sédiments, matières en suspension, métaux traces, hydrocarbures aromatiques polycycliques, tendances temporelles



Dynamiques spatiales et temporelles des flux spécifiques de micropolluants dans le bassin du Rhône, comparaison avec des grands fleuves du monde

Hugo Delile^{1*}, André-Marie Dendievel², Matthieu Masson¹, Cécile Miège¹,
 Jérôme LeCoz¹, Brice Mourier², Marina Coquery¹

¹INRAE, UR RiverLy, France

²Univ. Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, ENTPE, UMR CNRS 5023 LEHNA, France

Un des objectifs de l'Observatoire des sédiments du Rhône (OSR) mis en place depuis 2009 est de combler le manque de connaissances sur les flux particuliers de micropolluants rejetés dans la mer Méditerranée. Le réseau de mesure des flux de l'OSR comprend douze stations de mesure en continu, dont trois stations situées sur le Rhône lui-même, et neuf autres mises en place à l'extrémité aval de ses principaux affluents. Sur la seule base des flux de micropolluants, la comparaison des niveaux de contamination des sous-bassins hydrographiques du Rhône, d'une part, et du fleuve Rhône par rapport aux autres grands fleuves du monde, d'autre part, n'est pas pertinente. Pour pouvoir comparer les flux moyens de bassins versants de tailles variables, nous avons eu recours aux flux inter-annuels spécifiques de 29 micropolluants (métaux réglementaires, PCBs, et HAPs) - flux pondérés par la taille du bassin versant. Dans le cadre de cette étude nous nous sommes concentrés sur l'évaluation de deux hypothèses. Premièrement, nous estimons que l'intensité et la nature de la contamination chimique sont très hétérogènes au sein même du bassin versant du Rhône. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons croisé les flux de contaminants avec des indicateurs démographiques et d'occupation des sols. Deuxièmement, l'ampleur de la contamination du Rhône et celle des autres grands fleuves devrait varier en fonction des niveaux de développement des bassins concernés. Au-delà des trajectoires spatiales de contamination, nous abordons ici les tendances temporelles de la contamination du Rhône. Elles ont été évaluées finement au cours des dix dernières années pour le Rhône et ses affluents à l'aide des données collectées dans le cadre du programme OSR. Puis, elles ont été étendues aux trente dernières années sur le Rhône et sur certains grands fleuves du monde en considérant les données issues de sédiments de surface, de matières en suspension et de carottages.

Mots-Clés : Flux spécifiques de micropolluants, métaux, HAPs, PCBs, Rhône, fleuves du monde, bassin versant, tendances spatiales et temporelles de contamination, Observatoire des Sédiments du Rhône



Evolution de la pollution métallique et du risque écotoxicologique le long du Rhône depuis 1960 : approche combinée à partir de données de suivi particulaire et d'archives sédimentaires datées

André-Marie Dendievel^{*1}, Brice Mourier¹, Aymeric Dabrin², Céline Bégorre²,
Alexandra Coynel³, Antoine Gosset^{1,4}, Myriam Hamada¹, Yohan Liber¹, Hugo
Delile², Jean-François Berger⁵, Jean-Philippe Bedell¹

¹ Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, ENTPE, UMR5023 LEHNA, F-69518, Vaulx-en-Velin, France

² INRAE, UR RiverLy, Villeurbanne – France

³ Université de Bordeaux, UMR CNRS 5805 EPOC, Pessac – France

⁴ Ecole Urbaine de Lyon, Villeurbanne – France

⁵ CNRS, UMR 5600 EVS-IRG, Bron – France

En Europe, le développement industriel post-1945 a conduit à une pollution métallique importante des sédiments fluviaux. L'évaluation de cette pollution a été l'une des problématiques environnementales majeures dès les années 1970. Les programmes de suivis réglementaires ont produit une grande quantité de données basées sur des méthodes d'échantillonnage et d'analyses hétérogènes (laisses de crue, dépôts de fond et carotte sédimentaires). Afin de répondre aux questions d'identification des sources de pollution et de l'état actuel de la qualité des fleuves, nous proposons une méthode pour prendre en compte l'ensemble des données disponibles à l'échelle du Rhône, de Genève à Arles (Suisse – France, 512 km). Après avoir analysé la qualité des données disponibles (valeurs manquantes, granulométrie, analyse compositionnelle), nous avons basé notre approche sur l'Igeo (indice de géo-accumulation) pour reconstituer les tendances spatio-temporelles de pollution. Des bruits de fond géochimiques ont été établis localement suivant la diversité géologique du bassin-versant. Cette synthèse inédite montre une importante pollution en cuivre dès 1960 dans le Haut Rhône à relier avec l'usage de sulfate de cuivre dans les vignobles notamment (bouillie bordelaise). La pollution en plomb, zinc et cadmium a également été très importante en aval des centres urbains, industriels et les districts miniers de la moyenne vallée du Rhône durant les années 1980-1990 en raison d'une désindustrialisation limitée et de la persistance de sédiments pollués sur le long terme. La qualité des sédiments a mis entre 15 et 40 ans pour s'améliorer significativement selon les secteurs et les polluants (elle est globalement stable depuis 2005). Néanmoins, la part des métaux reste très importante au sein du cocktail de polluants dans le Haut Rhône, et participe à l'augmentation graduelle du risque écotoxicologique depuis 1960 le long du Rhône en s'ajoutant aux polluants organiques persistants (POPs).

Mots-Clés : Eléments traces métalliques ; Cours d'eau ; Fond géochimique ; Indice de Géo-accumulation ; Trajectoires de pollution ; Effet cocktail



Analyses multi-élémentaires de sols par LIBS : vers un dosage in situ des métaux et du carbone total

Cécile Fabre ^{1*}, Alexis De Junet ², Merhan Mohaverad ², Saad Meriji ²

1 GeoRessources- CNRS - Université de Lorraine -
France2 LIEC- CNRS- Université de Lorraine -
France

L'anthropisation des sols a entraîné la présence importante d'éléments en traces métalliques (ETM) dont les teneurs varient de la dizaine à plusieurs milliers de mg.kg⁻¹. Ces concentrations restent dépendantes du type de sols et de l'historique des sites industriels. Actuellement, les polluants métalliques sont analysés in situ par des outils XRF portatifs, mais pour des études plus larges que les ETM, les éléments légers restent mal ou non dosés et la présence d'eau reste problématique. Nous avons choisi ici d'utiliser un outil portable LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) car cette technique a été validée depuis une dizaine d'années au sein de la communauté des Géosciences.

Nous décrirons la technique analytique LIBS, son fondement physique, sa mise en pratique pour le cas présenté, ses atouts et ses points faibles au regard des analyses plus communément utilisées. Nous montrerons l'apport spécifique de l'outil portable LIBS (Z300© SciAps) pour la détection des éléments lourds et des légers comme le carbone sur différents types de sols (sols agricoles, forestiers et anthropisés) et pour optimiser l'échantillonnage et diminuer le coût des analyses.

En utilisant des données globales (ICP-AES) obtenues sur les mêmes sols, des courbes d'étalonnage ont été réalisées afin d'obtenir des estimations quantitatives rapides des éléments majeurs et traces. La détection et la quantification du carbone total dans des pastilles de sol sont un atout supplémentaire pour cet outil portable.

Mots-Clés : LIBS, outils portables, sols anthropisés, carbone, métaux lourds



Géoarchéologie d'un pont romain sur le Vistre de la Fontaine (Nîmes, France) : risque fluvial et paléo-pollution au Pb

Clément Flaux ^{1*}, Maxime Scrinzi ¹, Sabrina Save ², Alain Véron ³, Loïc Buffat ¹

1 : Mosaïques Archéologie,
France2 : Amélie, France
3 : CEREGE, CNRS, France

La fouille (géo)archéologique préventive du site du Vistre de la Fontaine 2.2 (O.A. 1111365) a été prescrite dans le cadre d'un aménagement environnemental visant à redonner au cours de la rivière son tracé sinueux qui avait été rectifié au début des années 1950. La fouille a permis d'ouvrir une fenêtre sur le paléo-vistre de la Fontaine permettant d'en étudier l'évolution à l'échelle pluri-millénaire. Stratigraphiquement la séquence géoarchéologique a enregistré sur l'emprise investiguée la mise en place d'un paléo-chenal du Vistre de la Fontaine dans la plaine de la Vistrenque vers le 6-5^{ème} siècle avant J.-C., la mise en œuvre d'un pont enjambant le chenal au cours du Haut Empire et la construction et l'évolution d'un méandre jusqu'à la période contemporaine. L'étude ouvre trois problématiques de recherche géoarchéologique mise en perspective dans le contexte régional méditerranéen :

- (1) L'apparente corrélation chronologique entre la défluviation du chenal du Vistre de la Fontaine et la fondation et le développement de la cité nîmoise et de son territoire au 6^{ème} siècle av. J.-C. est discutée en termes de forçage anthropo-climatique.
- (2) L'architecture des fondations du pont romain en pierres maçonnées, l'utilisation de mortier hydraulique et l'enrochement du fond du chenal manifestent l'attention particulière accordée à la question du risque d'érosion des piles, inhérent à la mise en œuvre d'un pont et toujours d'actualité pour les maître d'ouvrage de ponts contemporains. Le site permet ainsi d'alimenter la question de la gestion du risque fluvial à l'époque romaine.
- (3) La séquence a également fait l'objet d'une analyse géochimique (pXRF) qui a permis de mettre en évidence une paléo-pollution au plomb datée de la période romaine et vraisemblablement associée à l'utilisation massive de ce matériau, notamment pour les canalisations, dans la cité antique nîmoise. Le site d'étude aurait donc enregistré une paléo-pollution diffusée dans l'environnement jusqu'à 3 km à l'aval de la cité. Des analyses des isotopes du plomb sont actuellement en cours afin de déterminer sa provenance et de contribuer à la connaissance de l'économie de ce minerai très utilisé à l'époque romaine.

Mots-Clés : Géoarchéologie fluviale ; géomorphologie ; paléo-risque ; forçage anthropique ; forçage climatique ; paléo-pollution



La dispersion des éléments traces métalliques dans la zone critique à partir de déchets miniers : l'exemple de la mine de Pb-Ag de Peisey-Nancroix

Floriane Guillevic^{1*}, Magali Rossi¹, Fabien Arnaud¹, Jérôme Poulenard¹

Laboratoire Environnement Dynamique Territoire Montagne (EDYTEM) – CNRS : UMR5204, Université Savoie Mont Blanc - France

L'exploitation des ressources minérales est l'une des activités anthropiques les plus impactantes sur l'environnement et conduit à la dispersion des éléments traces métalliques (ETMs, p. ex. Pb, Sn, As, Cd et Cu) dans la zone critique. La mine de Pb-Ag de Peisey-Nancroix (Alpes françaises) est une excellente cible pour étudier les impacts environnementaux à long-terme (>150 ans) des activités minières anciennes, et l'héritage des ETMs dans l'environnement puisque toutes les étapes du cycle minier, de l'extraction au traitement du minerai étaient présentes sur le site. 22 000 t de Pb et 53 t d'Ag ont été extraits de la mine, produisant un volume important de déchets miniers et métallurgiques laissés à l'abandon. Leur altération météorique contribue à la dispersion et à la contamination en ETMs dans les sols en aval.

Les trajectoires spatiales et temporelles des ETMs vers la zone critique ont été déterminées à partir de données géochimiques, de la caractérisation minéralogique des phases porteuses des ETMs et des propriétés du sol (pH, CEC, teneur en carbone, etc.).

120 échantillons de sol de surface ont été collectés selon une maille systématique de 40 mètres couvrant le site métallurgique et minier. En raison du contexte géologique complexe, la zone étudiée présente deux types de sol (l'un à dominance carbonatée et l'autre à dominance silicatée) et différents usages. La distribution spatiale de la concentration en ETMs dans les sols de surface indique un gradient de contamination d'origine anthropique partant de la zone de traitement du minerai vers l'aval : Pb varie de 120 mg/kg à 3.4%, Sb de 1.5 à 630 mg/kg, As de 24 à 2269 mg/kg et Zn de 27 à 1578 mg/kg. Les facteurs de contamination (CF) et d'enrichissement (EF) ont été calculés à partir d'un échantillon de sol local non contaminé. La plupart des échantillons indique un enrichissement sévère à extrêmement sévère ($10 < EF_{Pb} < 1000$).

Une caractérisation détaillée des phases porteuses du Pb dans les sols a été réalisée le long du gradient de contamination à l'aide du MEB. L'altération du minerai (galène) et des scories produit des phases porteuses du Pb solubles. La cérosite se trouve dans les sols les plus contaminés. Le plomb est également fréquemment associé à des oxydes de Fe et Mn. Dans les zones les moins contaminées, le Pb est essentiellement adsorbé à la matière organique.

Mots-Clés : déchets miniers, mine ancienne, trajectoires des ETMs, phases porteuses du plomb

*Intervenant



Développement méthodologique pour l'analyse de la matière organique dans les carbonates secondaires. Cas d'étude en milieu urbain (Paris, Lyon).

Julia Garagnon ^{*1,2} – Yves Perrette ² – Emmanuel Naffrechoux ² –
Edwige Pons-Branchu ¹

¹ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement LSCE/IPSL, CEACNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay, F-91198 Gif-sur-Yvette, France.

² Environnements et DYnamiques des Territoires de Montagne, Université Savoie Mont Blanc — CNRS, Savoie Technolac, 73376, Le Bourget du Lac, France

Dans le contexte actuel d'anthropisation intense, la préservation des ressources en eau et la limitation des pollutions sont au cœur des préoccupations environnementales. Parmi les traceurs de la pollution organique et anthropique des eaux, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs) sont couramment utilisés.

Considérés comme archives de la qualité des eaux du passé, les spéléothèmes des sous-sols urbains ont déjà été utilisés pour montrer l'impact de l'urbanisation sur la qualité de l'eau par l'étude des éléments en traces. Leur utilisation pour retracer les variations en quantité et en qualité de la matière organique, dont les HAPs, sur les derniers siècles, est inédite et implique un développement méthodologique long et rigoureux.

Pour cela, ici, nous couplons des analyses par imagerie de fluorescence UV en phase solide à haute résolution (10 μm) avec les analyses chimiques classiques (extraction et chromatographie) conduites sur des échantillons de quelques grammes.

L'imagerie de fluorescence en phase solide, encore peu développée sur les spéléothèmes, est une technique non destructive. Deux approches sont utilisées : (i) la mesure de fluorescence en état stationnaire et (ii) la mesure des déclins de fluorescence. Pour obtenir des données quantitatives, la spectroscopie en phase solide est combinée avec les analyses des composés en phase liquide. La quantification C_{org} et N total est réalisée en routine. L'analyse des HAP est plus complexe en raison de leur faible concentration. Le protocole, en cours d'optimisation, consiste en un processus d'extraction et d'analyse par chromatographie en phase liquide haute performance couplé à un détecteur de fluorescence.

Cette méthodologie sera appliquée sur des échantillons, de Paris et Lyon principalement, sélectionnés suivant un gradient d'urbanisation. Des données quantitatives et diachroniques sur la pollution organique de l'eau en lien avec l'occupation des sols sont ainsi attendues.

Mots-Clés : pollution, urbanisation, spéléothèmes, matière organique, HAP, fluorescence UV, chimie organique.



Suivi de l'altération de laitiers sidérurgiques par une approche multi-méthodes : chimie, minéralogie, magnétisme

Maud Herbelin ^{*1}, Jérôme Bascou ¹, Véronique Lavastre ¹, Damien Guillaume ¹

¹ Univ Lyon, UJM, UCBL, ENSL, CNRS, LGL-TPE, F-42023, Saint Etienne, France

Plus de 400 millions de tonnes de laitiers sidérurgiques sont produits chaque année dans le monde. Si une majorité est aujourd'hui recyclée, principalement sous forme de granulats ou additifs dans les ciments, des quantités importantes sont encore mises en décharges tous les ans (de 1 à 4 millions de tonnes en Europe). Les propriétés mécaniques (gonflement, instabilité hydraulique) et la présence d'éléments-traces métalliques (chrome, vanadium, baryum) sont les principaux obstacles au recyclage de ces laitiers. Il est nécessaire de connaître le comportement sur le long terme de ces matériaux, afin de prédire le lessivage de métaux potentiellement toxiques pour l'environnement.

Le site d'étude est situé à Châteauneuf, dans la Loire, où ont été accumulés pendant plusieurs décennies des laitiers d'aciérie à arc électrique, soumis à l'altération météorique. Ces laitiers présentent des teneurs importantes en chrome (entre 1 et 3 %). L'objectif de l'étude est de comprendre davantage les processus de transformations qui se produisent au cours de l'altération de ces matériaux. Différentes analyses ont été mises en place afin de connaître leur propriétés chimiques, minéralogiques et magnétiques, à la fois en laboratoire et sur le terrain. Les mesures magnétiques en particulier ont permis d'affiner la caractérisation des oxydes de fer présents dans les laitiers et responsables de leur très haute susceptibilité magnétique. Par ailleurs des corrélations entre la susceptibilité magnétique et certains métaux (Cr, Mn et V) ont été mises en évidence. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives pour l'utilisation des mesures magnétiques comme un outil de suivi environnemental sur les crassiers sidérurgiques. En parallèle l'installation de lysimètres et des tests de lixiviations ont permis d'évaluer la mobilité des métaux présents et de comprendre les transformations minéralogiques qui s'opèrent au cours de l'altération.

Mots-Clés : laitiers sidérurgiques, altération, éléments-traces métalliques, chrome, susceptibilité magnétique



Sélection d'amendements organiques et minéraux pour diminuer la mobilité de contaminants (Pb, As, Ba, Zn) dans des résidus miniers: apport pour la phytostabilisation assistée

Lydie Le Forestier ^{*1}, Hugues Thouin ², Marie-Paule Norini ², Pascale Gautret ¹,
Fabienne Battaglia-Brunet ^{1,2}

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

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), France.

Les résidus miniers sont des sources majeures de contamination en métaux et métalloïdes dans l'environnement, de par leur dispersion lors de l'envol de particules ou leur lixiviation et transfert vers les nappes souterraines et les eaux superficielles. La stabilisation physique et géochimique de ces résidus acides, toxiques, pauvres en nutriments et de texture sableuse constitue un sérieux défi environnemental. En vue de faciliter le développement d'une couverture végétale et de diminuer la mobilité du Pb issu des résidus d'une ancienne mine d'Ag-Pb, des expériences de percolation en microcosmes ont été réalisées pour comparer l'efficacité d'amendements minéraux et organiques (Thouin et al., 2019). Ces résidus ont été mélangés avec 5% en poids d'«ochre», une boue minière riche en oxy-hydroxydes de fer, et avec du fumier de vache (0, 0,15, 1 et 2% en poids), et le résidu non amendé a servi de témoin. Les microcosmes ont été soumis à un arrosage hebdomadaire pendant 84 jours. L'ajout d'ochre a permis d'augmenter le pH de 4 à des valeurs comprises entre 7 et 8 et de diminuer considérablement la concentration en Pb dissous (de 13 à 15 mg.L⁻¹ à 0,1 mg.L⁻¹), sans croître significativement la mobilité de As, Ba et Zn. Les oxy-hydroxydes de fer ont ainsi adsorbé majoritairement Pb. Une augmentation transitoire de la diversité microbienne fonctionnelle et d'une lixiviation modérée de Pb (0,4 mg.L⁻¹) a été observée par l'ajout de 1% et 2% de fumier avec un pic après un mois d'incubation, ces deux phénomènes étant liés à la maturation du fumier. Les microcosmes plantés ont révélé que la croissance du ray-grass était améliorée par l'ajout d'ochre et de fumier, avec une biomasse multipliée par 4,8 comparativement au résidu seul. La prochaine étape expérimentale concerne le suivi de la phytostabilisation à l'échelle métrique, en mésocosme instrumenté, avec les amendements sélectionnés et *Agrostis capillaris*, une espèce végétale naturellement présente sur le site minier.

Mots-Clés : Plomb, Résidus miniers ; Lixiviation ; Oxydes de Fer ; Matière organique ; Diversité microbienne.

Thouin H. et al. (2019), Microcosm-scale biogeochemical stabilization of Pb, As, Ba and Zn in mine tailings amended with manure and ochre. *Appl. Geochem.* 111, 104438

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet Phytoselect financé par la région Centre-Val de Loire (contrat N°2016- 00108485) et a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'Avenir LabEx VOLTAIRE, 10-LABX-0100



Magnetic biomonitoring of traffic-related particle matter deposition: which data for which uses?

Sarah Letaïef ^{*1}, Pierre Camps ¹, Thierry Poidras ¹, Delphine Bosch ¹,
Patrick Nicol ¹

¹ Géosciences Montpellier, CNRS.

Can we use environmental magnetism as a marker to the captation of traffic-related particle matter (PM) by mediterranean plants? To answer to that question, PM accumulations by hedges were studied in an experimental wind tunnel and in the case of the A9/A709 motorway junctions. Numerous geochemical studies have already demonstrated the possibility to trace sources and compositions of PM deposition on plants by using concentrations in trace elements (TE) and isotopic ratios. Otherwise, environmental magnetism is an alternative approach of biomonitoring, assuming that there is a direct connexion between the PM concentration of TE and the intensity of their magnetic properties, which allows to map the airborne pollutant depositions.

First experiments in a wind tunnel reveal that isothermal remanent magnetization relative change (IRM_{RC}) between before and after the pollutant injection is positive. Besides, IRM_{RC} values on leaves situated at the entrance of the tunnel are higher than those from the exit. These results are in line with the two airborne μ -sensors measurements, also located upstream and downstream to the hedge. The magnetic parameter has proven to be a good proxy to detect PM retention potential by the hedge. Meanwhile, results from along the motorway indicate that traffic-related PM are mainly composed of Cu, Zn, Sb, Pb which are directly derived from combustion residues, vehicles and equipment wears. A good correlation between IRM_{RC} and TE concentrations is noticed and validates our methodology. To confine the noise and the air pollution, three basic berms and a fourth located windward to the traffic being roofed with a noise barrier have been set up by the motorway company. Maximum IRM_{RC} are detected downstream of the noise barrier, which is located downwind while no significant deposition is observed on both sides of the basic berms. Because it seems counterintuitive and to complement magnetic analysis, a computational fluid dynamics modeling based on the Reynold-Averaged Navier-Stokes equations with the standard $k-\epsilon$ turbulence approach was performed and predicts as well, a recirculated pollution downstream to the berm wall combination, whereas the free-wall berm geometry does not alter air pollution transport and dispersion.

Mots-Clés : environmental magnetism, geochemistry, air quality, trace elements



Détermination des fonds pédogéochimiques en contexte d'ancien site minier

Jérémy Melleton ^{1*} - Valérie Laperche ¹ – Bruno Lemièrre ¹ – Blandine Clozel ¹
– Pascal Auger ¹ – Gael Bellenfant ¹

¹ : BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans cedex 2

L'évaluation de l'impact de l'activité minière repose sur la compréhension des contaminations issues de l'extraction et du traitement du minerai par rapport à des fonds géochimiques naturellement élevés liés à la présence des minéralisations.

Ces dernières années, la mise en œuvre d'études d'interprétation de l'état des milieux a permis de développer une approche méthodologique satisfaisante pour l'évaluation des fonds pédogéochimiques en contexte minier, basée sur l'utilisation *in situ* de la fluorescence X portable.

L'approche consiste à éliminer les sites impactés et probablement impactés par l'activité anthropique pour ne garder que les zones hors influence couvrant les mêmes formations lithologiques que les zones impactées pour déterminer les gammes de valeurs de fond pédogéochimique tout en prenant en compte la présence de minéralisations.

Les zones d'études couvrent généralement des surfaces significatives entre les sites d'extractions (carrières à ciel ouvert ou mine souterraine), généralement multiples, les installations de traitement et de transport des minerais (y compris la zone sous influence des fumées en cas de pyrométallurgie), les zones de stockage des stériles miniers et résidus de traitement et les zones possibles de contamination en aval des anciens sites. Les formations lithologiques variées peuvent impliquer des variations significatives des fonds géochimiques, notamment pour les sols et les sédiments.

Sur la base de la cartographie géologique au 1/50 000, et afin d'atteindre des paramètres statistiques significatifs en accord avec la récente norme (Lignes directrices pour la détermination des valeurs de bruit de fond, ISO 19258:2018), un regroupement des formations lithologiques est le plus souvent nécessaire, par exemple par grands ensembles pétrologiques (sédimentaires, métamorphiques, plutoniques, volcaniques, etc...) ou structuraux. La souplesse de l'analyse *in situ* permet par la suite de valider ou améliorer ces regroupements.

En second temps, le traitement des données géochimiques par une analyse statistique multivariée permet de mettre en évidence les signatures lithogéochimiques et valider ainsi la représentativité des données de fonds géochimiques obtenus.

Mots-Clés : Fond géochimique, environnement minier, pXRF



Représentativité de l'échantillonnage intégré des matières en suspension dans les rivières à l'aide de pièges à particules

Matthieu Masson ^{*1}, Aymeric Dabrin ¹, Pascaline Dieudé ¹, Alexandra Gruat ¹,
Loïc Richard ¹, Lysiane Dherret ¹, Ghislaine Grisot ¹, Jérôme Le Coz ¹, Olivier
Radakovitch ², Marina Coquery ¹

¹ UR RiverLy, INRAE – France

² IRSN – France

La surveillance des contaminants organiques hydrophobes et des métaux traces dans les eaux de surface nécessite la mesure des concentrations de contaminants dans la fraction particulaire de la colonne d'eau. Au cours des deux dernières décennies, des pièges à particules (PàP) ont été développés pour échantillonner les matières en suspension (MES). Les PàP permettent un échantillonnage intégré des MES dans le temps (quelques jours à plusieurs semaines), sont facilement déployables sur un réseau de surveillance et nécessitent une maintenance limitée. Alors que la représentativité des MES collectés par centrifugation à flux continu a été validée il y a 25 ans, la représentativité des particules collectées avec les PàP n'est pas totalement documentée. Depuis 2009, le programme de l'Observatoire des sédiments du Rhône (OSR) s'appuie sur les PàP utilisés par le réseau allemand (GESB ; German Environmental Specimen Bank) pour la surveillance des contaminants particuliers dans l'ensemble du fleuve Rhône et ses principaux affluents. L'objectif de cette étude est d'évaluer la représentativité des caractéristiques des MES et des contaminants associés prélevés à l'aide de ce type de PàP dans un grand fleuve.

Pour cela, la granulométrie, le carbone organique particulaire, le mercure, les métaux traces et les polychlorobiphényles ont été analysés dans des MES prélevées par PàP et par centrifugation à flux continu sur le Rhône sur une période de 10 ans et pour des périodes hydrologiques contrastées. Les MES capturées par les PàP sont plus grossières que les MES transportées dans le fleuve (prélevées par centrifugation) d'autant plus que le débit augmente. L'influence de ce biais sur les concentrations des contaminants a été estimée pour différentes conditions hydrologiques. Nos résultats montrent que ce type de PàP est un outil pertinent pour évaluer les tendances spatiales et temporelles des concentrations et des flux de contaminants particuliers dans les grands cours d'eau.

Mots-Clés : matières en suspension, pièges à particules, granulométrie, métaux trace, mercure, PCB



Lixiviation des contaminants métalliques (Pb, Zn) depuis des résidus miniers: nouvelles perspectives en modélisation géochimique

Samuel Mertz ^{*1,2}, Lydie Le Forestier ¹, Philippe Bataillard ², Nicolas Devau ²

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

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), France.

L'ajout d'amendements organiques et/ou inorganiques est souvent préconisé afin de stabiliser les résidus miniers et d'atténuer la lixiviation des contaminants. Dans une récente expérience de percolation en microcosmes (Thouin *et al.*, 2019), une boue minière riche en oxy-hydroxydes de fer, appelée « ochre », associée ou non à du fumier pourrait réduire considérablement le transfert des polluants métalliques, notamment Pb. Néanmoins, les processus biogéochimiques impliqués restent inconnus, rendant difficile l'optimisation de la remédiation des sites miniers. Un modèle réactif a donc été développé pour simuler l'impact des amendements sur la lixiviation des polluants métalliques, en prenant en compte les processus biogéochimiques suivants: réactions cinétiques de dissolution/précipitation, réactions de sorption, interactions eau-gaz et réactions redox d'origine microbienne. Les simulations ont montré que la réactivité du Pb suivait des schémas dynamiques liés aux étapes d'arrosage. La baisse de la concentration de Pb dans les lixiviats suite à l'ajout d'amendements a été reproduite avec précision. Dans les résidus non traités, la réactivité du Pb est notamment contrôlée par la dissolution des phases porteuses de Pb. Dans les résidus amendés, ce schéma s'est renforcé car les oxydes de fer apportés par l'ochre avaient maintenu une faible concentration de Pb dans la solution porale en adsorbant le Pb libéré. Les réactions de sorption ont été accrues par la hausse du pH via la dissolution de calcite présente dans l'ochre. Cette réaction a été partiellement contrebalancée dans les résidus amendés avec du fumier, car la matière organique a fourni suffisamment d'énergie pour alimenter la respiration microbienne, libérant des protons et favorisant la désorption du Pb. Ce modèle réactif donne une meilleure compréhension des effets des amendements inorganiques et organiques, permettant d'optimiser la réhabilitation des sites miniers en limitant le transfert de contaminants.

Mots-Clés : Plomb, Zinc, Résidus miniers, Oxydes de Fer, Matière organique, Sorption, Respiration microbienne, Phreeqc, Lixiviation.

Thouin H. et al. (2019), Microcosm-scale biogeochemical stabilization of Pb, As, Ba and Zn in mine tailings amended with manure and ochre. *Appl. Geochem.* 111, 104438

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet Phytoselect financé par la région Centre-Val de Loire (contrat N°2016- 00108485) et a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'Avenir LabEx VOLTAIRE, 10-LABX-0100



Nouvelle phase porteuse de plomb anthropique dans les sédiments fluviaux et estuariens à proximité d'une ancienne mine (Huelgoat, France)

Khoulood Nasri ^{*1,2}, Gwendoline Gregoire ^{1,2}, Anne Murat ^{1,2}, Marina Fiallo ³

1 Conservatoire National des Arts et Métiers [CNAM]- Institut des Sciences et Techniques de la Mer (INTECHMER)-Cherbourg- France

2 Université de Caen Normandie - Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg (LUSAC) : EA4253 – France

3 Université de Toulouse- Université PAUL SABATIER- Toulouse-France.

La diversité minérale de l'Anthropocène est le résultat de la purification des métaux naturellement combinés avec d'autres éléments chimiques dans la nature (Zalasiewicz et al. 2018) par le biais des activités minières. Les déchets de ces industries présentent une teneur en métaux très élevée et représente, à ce titre, une source potentielle de contamination. De nombreuses études montrent une pollution à proximité des sites miniers encore en activité (Macklin et al. 2006; Schroeder et al. 2007) ou abandonnés depuis quelques décennies à plusieurs siècles (Baron et al. 2005 ; Glorennec 2006 ;). Dans ce contexte, ces travaux portent sur la mine de Huelgoat (Bretagne, France), aujourd'hui inactive et ayant connu son apogée au cours du XVIII^{ème} et XIX^{ème}. Des analyses géochimiques réalisées sur des sédiments de rivière, prélevés en amont et aval de la mine, ont permis de mettre en évidence des teneurs 2 à 20 fois plus élevées (70 à 7000 mg/kg) que le seuil naturel (30 mg/kg). A ceci s'ajoute, l'étude des phases porteuses du Pb, identifiées dans les sédiments à granulométrie fine fines (< 50 µm) et grossières (> 50 µm), à partir de la diffraction des rayons X sur poudre (DRX), la microscopie électronique à balayage (MEB), le carbone organique total (COT) et les analyses de pH. Ces identifications ont permis de mettre en évidence pour la première fois, la formation d'un minéral anthropique (« Iodoplumbate ») dans un environnement naturel.

Mots-Clés : Phases porteuses de plomb, métaux lourds, environnement naturel, sédiments pollués, minéral anthropique, iodoplumbate, XRD, SEM.

Références :

Baron S, Lavoie M, Ploquin A, Carignan J, Pulido M, De Beaulieu JL (2005) Record of Metal Workshops in Peat Deposits: History and Environmental Impact on the Mont Lozère Massif, France. *Environ. Sci. Technol.* 39, 14, 5131-5140. <https://doi.org/10.1021/es048165l>

Glorennec P (2006) Analysis and reduction of the uncertainty of the assessment of children's lead exposure around an old mine. *Environmental Research*. Volume 100, Issue 2, Pages 150-158. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2005.03.007>

Macklin MG, Benito G, Gregory KJ, Johnstone E, Michczyńska LJ, Soja DJ, Starkel R, Thorndycraft LVR (2006) Past hydrological events reflected in the Holocene fluvial record of Europe. *CATENA*. Volume 66, Issues 1–2, Pages 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.07.015>

Schroeder W, Pesch R (2007) Synthesizing bioaccumulation data from the German metals in mosses surveys and relating them to ecoregions. *The Science of the total environment*, ISSN: 0048-9697, Vol: 374, Issue: 2-3, Page: 311- 27. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.015>

Zalasiewicz J, Waters C, Summerhayes C, Williams M (2018). The anthropocene. *Geology Today*, 34(5), 177-181. <https://doi.org/10.1111/gto.12244>



Les impacts environnementaux à long-terme des exploitations minières : la mine de Pb-Ag de Peisey-Nancroix (1644-1866, Alpes françaises)

M. Rossi ^{*1}, L. Spadini², J. Martins², A. Foulquier³, S. Pesce⁴, P. Paimbou-Ouenné²,
F. Guillevic¹, J. Poulenard¹

¹ EDYTEM/CNRS/USMB/UGA, 73376 Le Bourget du Lac, France

² IGE/CNRS/UGA, 38000 Grenoble, France

³ LECA/CNRS/UGA/USMB, 38000 Grenoble, France

⁴ RIVERLY/INRAE, 69625 Villeurbanne, France

La mine de Pb-Ag de Peisey-Nancroix (Alpes françaises) est une excellente cible pour étudier l'héritage et les impacts environnementaux à long-terme (>150 ans) des activités minières anciennes, et l'héritage des éléments traces métalliques (ETM) dans l'environnement : toutes les étapes du cycle minier, de l'extraction au traitement du minerai, se trouvaient sur un site de quelques hectares, qui est resté abandonné en l'état depuis la fermeture de la mine en 1866. 22 000 t de Pb et 53 t d'Ag ont été extraits de la mine, produisant un volume important de déchets miniers et métallurgiques laissés à l'abandon et soumis à l'altération météorique. Une étude interdisciplinaire a été conduite afin (i) de caractériser la contamination résiduelle sur le site minier, (ii) déterminer la spéciation et la biodisponibilité du Pb dans les sols, et (iii) évaluer les effets des ETM sur les fonctions microbiennes des sols.

Les sols de surface sont significativement enrichis en Pb, et localement en As, Sb et Cu, par rapport au fond géochimique naturel. Les sols développés sur les scories contiennent jusqu'à 3.4% Pb, 1695 ppm Zn, 381 ppm Sb et 168 ppm Cu. Les minerais sulfurés ont été altérés en cérusite et en oxydes de fer riches en Pb, contribuant ainsi à la dispersion du Pb dans les sols. Des tests de lixiviation (batch, 24h) ont été réalisés en utilisant divers réactants tels que l'EDTA, des acides humiques et de l'eau, ainsi qu'une solution issue de la macération d'aiguilles de mélèzes dans de l'eau pendant 24h, afin de modéliser des conditions naturelles de lixiviation. La quantité de Pb lixiviable est parfaitement corrélée à la teneur en Pb des sols. Les activités microbiennes (enzymes extracellulaires impliquées dans la décomposition de la matière organique et dans le recyclage des nutriments) diminuent lorsque la teneur en Pb augmente dans les sols de surface. Les activités minières passées impactent donc encore l'environnement plus de 150 ans après la fermeture de la mine.

Mots-Clés : sols, éléments traces métalliques, contamination, activités minières



T5.3.3 Risques littoraux



Using sedimentary fabric characterized by X-ray tomography to highlight tsunami and hurricane deposits within the same archive, Scrub Island (Anguilla)

Maude Biguenet ^{*(1)(2)}, Éric Chaumillon ⁽¹⁾, Pierre Sabatier ⁽²⁾, Raphaël Paris ⁽³⁾,
Pierre Vacher ⁽⁴⁾

(1) : Université de la Rochelle, UMR 7266 LIENSs, 17042 La Rochelle, France.

(2) : Université Savoie Mont Blanc, UMR 5204 EDYTEM, 73376 Le Bourget du Lac, France.

(3) : Université Clermont Auvergne, CNRS, IRD, OPGC, Laboratoire Magmas et Volcans, Clermont-Ferrand, France. (4) : Laboratoire SYMME, domaine Universitaire BP 80439, 74944 Annecy le Vieux, France.

The Lesser Antilles are a densely populated and very touristic region exposed to many short-term hazards such as hurricanes and tsunamis. However, the historical catalog of these events is too short to allow risk assessment and return period estimations, and it needs to be completed with long-term geological records. Two sediment cores were sampled in March 2018 (in the framework of ANR CARQUAKES) in a small coastal lagoon on Scrub Island (North Eastern Caribbean). In a previous work, we presented sedimentological, geochemical, microfaunal and chronological analyses that enabled us to identify 25 sandy layers resulting from high-energy marine floods. Two of those layers were interpreted as tsunami deposits. The most recent is associated with the transatlantic tsunami triggered by the 1755 Lisbon earthquake. The older is the thickest sandy layer recorded in the lagoon and is dated at 1415 cal. CE (1364-1469 cal. CE). The 23 remaining sandy layers were interpreted as resulting from hurricanes. Here, we present new sedimentological results obtained with X-ray tomography on 2 previously identified hurricane and the 2 tsunami deposits (Biguenet et al., 2021). The use of X-ray tomography enables to highlight the sedimentary grain fabric even in discrete sedimentary layers (5 mm thick). These sedimentary fabrics reveal differences between hurricanes and tsunamis deposits. This method and these sedimentary criteria provide important insights into distinguishing sedimentary deposits generated by hurricanes, near-field and far-field tsunamis.

Keywords : tsunamis, hurricanes, Lesser Antilles, lagoons, X-ray tomography

Biguenet, M., Sabatier, P., Chaumillon, E., Chagué, C., Arnaud, F., Jorissen, F., Coulombier, T., Geba, E., Cordrie, L., Vacher, P., Develle, A.L., Chalmin, E., Soufi, F., Feuillet, N., 2021. A 1600 year-long sedimentary record of tsunamis and hurricanes in the Lesser Antilles (Scrub Island, Anguilla). *Sedimentary Geology* 412, 105806.



Sur la vulnérabilité des plages à « *beachrock* » de Méditerranée : l'exemple du détroit de Messine (Italie)

Pascal Barrier, Valérie Galin et Maude Thollon

UniLaSalle – Collège géosciences, 19 rue Pierre Waguët, BP 30313 60026 Beauvais cedex
et B2R (Bassins, Réservoirs, Ressources) - EA 7511

Le rivage du Déroit de Messine connaît une forte érosion de ses plages. Le sable, les graviers et les galets disparaissent du trait de côte suite à un manque cruel d'alimentation des torrents. En conséquence, c'est la roche de dessous de plage, le « *beachrock* » des plages fossiles lithifiées, qui affleure. Ce fait récent a permis la réapparition, sur le *beachrock*, d'anciens sites d'extractions de meules de moulin, montrant ainsi que le décapage du sable des plages du Déroit est un phénomène récurrent. Des données originales ont été recueillies, tant à Lazzaro, sur la cote calabraise, qu'à Ganzirri sur la côte sicilienne, sur les modes d'extraction et de transport des pierres, en liaison directe avec la mer. Les caractéristiques pétrographiques et typologiques des meules ont également été inventoriées. Des écrits permettent de dater les extractions entre 1810 et 1870 tandis qu'elles ont totalement disparu de la mémoire locale. L'architecture sédimentaire des roches de plage, avec ses trois générations de *beachrock* superposés, renseigne aussi sur les variations des lignes de rivage. Le premier n'est connu qu'à l'état de dalles remaniées dans le second, attestant d'un démantèlement complet. Il n'est pas daté. Le second est d'époque romaine. Il est largement préservé puisque c'est lui qui est surtout exploité en carrière au XIX^{ème} siècle. Le dernier *beachrock* vient épouser les reliefs d'érosion du précédent. Les contacts en falaises entre ces deux générations de *beachrock* s'accompagnent d'encroûtements biogènes à balanes et huîtres jusqu'à plus de 3 mètres au-dessus du niveau marin actuel. Ce troisième *beachrock*, qui ne contient que des clous en fer, date probablement du Moyen-âge. Il englobe également des dalles remaniées du second attestant de destructions locales. Cette succession de *beachrock* indique que les rivages du Déroit passent alternativement d'une côte sableuse à une côte rocheuse et que cette dernière est très facilement démantelée si le ré-ensablement est trop long à se mettre en place. Un ordre de grandeur de vitesse d'inversion nous est donné par le recul de la dernière côte sableuse, engagé il y a 30 ans, qui a conduit il y a 5 ans au décapage total de la roche. En 5 ans le *beachrock* à traces d'enlèvements de meules a largement été démantelé à tel point qu'il ne serait plus possible aujourd'hui de réaliser un relevé complet des carrières. Aujourd'hui le sable est aussi en partie revenu sur les plages. Cette séquence montre à quel point la côte est vulnérable lorsqu'apparaît le *beachrock*. Le recul du trait de côte est alors très rapide, mais il est toutefois temporaire puisqu'il suffit que le sable revienne pour que se reforme une nouvelle roche de plage. Bien qu'éphémères, ses observations constituent aussi un apport essentiel à la compréhension des variations récentes du niveau de la mer de cette région qui connaît une surrection de plusieurs millimètres par an compensant largement la montée des eaux due au changement climatique.

Plage, *beachrock*, méditerranée, Holocène, érosion, eustatisme



Trajectoires de vulnérabilités : Etude du cas de Saint-Martin (Caraïbes)

Julien Gargani ^{1,2*}, Kelly Pasquon ^{3,1}, Gwenaël

Jouannic ^{3,1}Geops, Université Paris-Saclay - France

²Centre d'Alembert, Université Paris-Saclay - France

³CEREMA - France

En 2017, l'île de Saint-Martin (Antilles) a été touchée par l'ouragan Irma qui a tué sur place 11 personnes, détruit de nombreux bâtiments et affecté l'économie. Pourquoi l'île de Saint-Martin est-elle si vulnérable et à quoi est-elle vulnérable ? Dans cette étude, nous montrons que l'île de Saint-Martin a dû s'adapter entre 1950 et 2020 à de nombreuses contraintes, dont certaines d'une ampleur bien plus importante que les ouragans. L'étude est basée sur l'analyse de photographies aériennes et d'images satellites sur la période 1947-2019 sur l'ensemble de la partie française de l'île, mais aussi d'une étude sur le terrain, de la rencontre d'acteurs locaux et d'une synthèse de données. En l'espace de 70 ans, la densité de population de la partie française de Saint-Martin est passée de 75 hab/km² à 668 hab/km². La majeure partie de cette augmentation s'est produite en l'espace de 5 ans, suite à une loi de défiscalisation qui a favorisé l'investissement immobilier à partir de 1986 : la loi Pons. Le nombre d'habitants est passé de 8000 en 1982 à 28000 en 1990 dû à l'arrivée des nouveaux propriétaires, mais aussi des personnes travaillant dans les métiers de la construction et du tourisme. Plus de 12 000 bâtiments ont été construits à Saint-Martin pour accueillir les nouveaux habitants de l'île et les touristes. De nombreux quartiers ont connu une croissance importante qui a débuté à la fin des années 1980. L'économie de l'île s'est profondément transformée durant les derniers 70 dernières années, passant d'une économie agricole à une économie dépendante du tourisme. On observe des spécificités dans l'urbanisme qui résultent de la très forte ségrégation sociale et territoriale qui règne sur l'île entre, d'un côté, les résidences privées des quartiers aisés et de l'autre les quartiers populaires, avec des habitations plus vulnérables. Les ouragans ont eu pour effet de renforcer les inégalités datant des années 1960-1980 en affectant plus particulièrement les habitats fragiles des populations les plus pauvres. Ces inégalités sont également accentuées par les aides à la reconstruction qui sont allouées dans la pratique aux personnes mieux insérées socialement (assurances, prêts, aides psychologiques, aides conditionnelles nécessitant de remplir des documents administratifs et des justificatifs...).

Mots-Clés : Risques, Ouragan, Irma, économie, démographie, vulnérabilité, adaptation



Subsidence and relative sea level rates in the Bengal delta

C. Grall* ^{1,2}, M. Steckler ², Y. Krien ¹, S. Goodbred ³, A. Winner ⁴, N. Rezwan¹, M. Karpytchev ¹, K. Ferrier ⁵, M. Becker ¹, S.H. Akther ⁶

¹. CNRS, LIENSs, La Rochelle University, La Rochelle, France

². LDEO of Columbia University, Palisades, NY, USA

³. Vanderbilt University, Nashville, TN, USA

⁴. GeorgiaTech, Atlanta, GA, USA

⁵. UW-Madison, Madison, WI, USA

⁶. Dhaka University, Dhaka, Bangladesh

Subsidence in delta plains is a critical factor that plays on present, past and future relative sea levels. Also, subsidence in delta plains may vary depending on the time scale considered. We here provide results from Holocene subsidence rates in the Bengal Delta and analyze together the different driving forces that act on subsidence. Rates and spatial distributions of sedimentation and subsidence have been determined in the Bengal Delta through the Holocene. This has been achieved by reconstructing relative sea level history over the Holocene according to the stratigraphic records. Results provide evidence of moderate Holocene subsidence over the delta, gently increasing seaward from 2 ± 0.7 mm/yr in the middle fluvial delta to 4 ± 1.4 mm/yr in the lower tidal delta while ~ 150 m of sediment may be deposited near the present shoreline over the Holocene. The potential contributions of sediment compaction, sediment isostasy and glacio-isostatic adjustments are computed by numerical modelling and considered on regional 2D stratigraphic models to test the validity of the models. Results suggest that sediment compaction, i.e. the mechanical and chemical compaction of the underlying sedimentary column that react to the load of sediment deposited, may be on major control on the subsidence and rates. Also, sediment isostasy may be significant in such extreme context of sedimentation and tectonic heterogeneities may significantly change the subsidence pattern over the delta plain. Both sediment compaction and isostatic adjustments are processes that are modulated by the geological history of sediment deposited over the delta and in particular recent subsidence rates may be strongly influenced by the early Holocene fast sea level rise. This has direct implications on our understanding of present and near future relative sea level rise and challenges human societies on managing their negative impact on such processes.

Mots-Clés : Niveau Marin, Isostasie sédimentaire, Delta



Caractérisation spatiale et temporelle du recul du sommet de falaise basque entre 1938 et 2018 : recherche méthodologique et mise en relation avec les facteurs de prédisposition

Lisa Martins^{1-2*}, Lucie Guillen²⁻³, Yannick Thiery², Thomas Dewez², Clara Levy²,
Christophe Garnier³

¹ Université Paris I Panthéon-Sorbonne, Paris, France

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Orléans, France

³ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Pessac, France

Le littoral à falaise basque est soumis à une pression anthropique pouvant être contrariée par des processus érosifs se manifestant par des instabilités gravitaires. La gestion de cette frange côtière et des risques associés apparaît donc comme essentielle pour la protection des biens et des personnes, rendant nécessaire une connaissance précise des aléas 'instabilités gravitaires'.

L'objectif de cette étude est de caractériser la dynamique de l'érosion de la côte à falaise, ainsi que les facteurs de prédisposition qui la conditionnent. Afin de répondre à ces objectifs, une approche pluridisciplinaire a été mise en œuvre. Premièrement, une approche spatiale à partir d'une analyse diachronique des photographies aériennes (1938-2018) et tenant compte du sommet des falaises permet de caractériser géographiquement et temporellement le recul du trait de côte. Plusieurs méthodes de calcul du recul sont testées et comparées soit : (i) le différentiel des « surfaces perdues » et (ii) *End Point Rate (EPR)*, et (iii) le *Weighted Linear Regression (WLR)* ; les deux dernières méthodes étant incluses dans l'approche *Digital Shoreline Analysis System*. Dans un second temps, il s'agit de mieux comprendre la répartition spatiale des taux reculs en les mettant en relation avec les différents facteurs de prédisposition.

La présentation montrera les premiers résultats qui rendent compte d'un recul hétérogène à l'échelle de la côte basque d'un point de vue spatial et temporel. Cette hétérogénéité dépend également de la méthode utilisée pour calculer ce recul. Ainsi, si les méthodes *EPR* et *WLR* surestiment les taux de recul, la méthode des « surfaces perdues » semble la plus adaptée pour estimer le recul de la côte à falaises basque. Enfin, la présentation se focalisera sur les facteurs de prédisposition qui influencent le plus le recul. Cette recherche sera versée au projet FEDER Ezponda et doit aider à mieux comprendre comment s'organise cette érosion par instabilités gravitaires.

Mots-Clés : falaises, érosion côtière, côte basque, évolution du trait de côte, instabilité gravitaire, risque côtier



Changements morphologiques de l'île de Jerba (Rive Sud du bassin méditerranéen, SE-Tunisie)

Hanen Saïdi ^{*1}, Meyessa Jhine¹

¹: Laboratoire 3G (Géodynamique, Géo-numérique et Géomatériaux), Département de Géologie, Faculté des Sciences de Tunis, 2092, Université Tunis El Manar - Tunisie

L'île de Jerba (rive sud du bassin méditerranéen, SE-Tunisie) est classée dernièrement, par l'UNESCO, comme un patrimoine international de grande importance.

Les changements morphologiques de cette île sont déterminés en étudiant l'évolution de son trait de côte sur une période de 45 ans, de 1975 à 2020, et ce à l'aide des photographies aériennes (mission 1995) et des images satellitaires (Landsat 1 MSS, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI_TIRS et Sentinel 2 A).

Les différentes positions du trait de côte ont été extraites automatiquement en déterminant l'indice de l'eau MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) et le calcul de leurs rythmes d'évolution (m/an) a été fait à l'aide de l'extension DSAS (Digital Shoreline Analysis System) du logiciel Arc GIS.

L'évolution du trait de côte, durant la période 1975-2020, montre une érosion générale le long de la totalité du linéaire côtier de l'île qui a atteint plus de 10 m/an, entre le port d'Aghir et la flèche sableuse de Borj El Kastel. En effet, l'île est en train de perdre les sédiments de ses plages.

Parmi les facteurs d'érosion, l'augmentation de la vitesse du vent de 1970 à 2019, l'exposition à des houles dominantes énergétiques, l'absence des apports solides fluviaux à cause de l'absence des cours d'eau, l'effet des courants de marée (le marnage qui est de 2 m est le plus important en méditerranée), l'augmentation du niveau de la mer à cause du réchauffement climatique et la destruction des dunes bordières par des séries d'hôtels...

La situation de l'île est alarmante nécessitant une intervention en urgence surtout que le recul du trait de côte s'est accéléré ces quatre dernières années, entre 2016 et 2020.

Mots -Clés: Morphologie, Trait de côte, MNDWI, DSAS, Erosion, Ile, Jerba, Tunisie, Méditerranée



T5.3.4 Glissement de terrain



Les dépôts volcaniques le long de la faille de Limagne dans le Massif Central Français: cas de Grave Noire, résultats préliminaires par analyse d'images.

Karine Bernard ¹, Francisco Nunez-Trezeguet ^{*2}, Tiffany Becar ^{* 1-2}

1. UCA, LMV, 6 avenue Blaise Pascal 63178 Aubières, France.
2. STEE-Océanographie, Université de Bordeaux, France.

Le système volcanique de Grave Noire (Pleistocène supérieur) localisé en bordure de la faille de Limagne a fait l'objet d'une analyse d'images comparée afin de préciser d'une part ses caractéristiques géomorphologiques par rapport au contexte géologique régional mais aussi de quantifier les faciès avalancheux des blocs, localisés à plus de 6 km de l'édifice. Une analyse géomorphologique d'une dizaine de volcans ont permis de corréliser la hauteur et l'altitude en fonction de la distance de transport des avalanches de débris et coulées de laves. Les cônes associés aux avalanches de débris sont différenciés des cratères égueulés à coulée de laves. Une droite de régression permet de différencier les déstabilisations en Limagne des avalanches de débris volcaniques. Cartographie, analyses texturales et calculs des paramètres morphométriques à l'aide du logiciel ImageJ (solidité, rondeur et circularité) ont permis de caractériser les blocs situés aux fronts de charriage avalancheux. Au sein des blocs, les faciès scoriacés et lisses ont permis de positionner les blocs de lave au sein de la coulée en rapport avec sa fracturation *syn*-transport. Les valeurs de circularité et de solidité sont respectivement comprises entre 0,39 et 0,80 et entre 0,85 et 0,96. La rondeur varie de 0,25 à 0,90. Elle apparaît différenciée des blocs de Tutupaca (Pérou) proches de Socompa (Chili). Six régressions linéaires sont ainsi établies pour Tutupaca et Grave Noire. Une origine commune des blocs de Grave Noire apparaît associée à une évolution différente.

Ces valeurs, à confirmer d'un point de vue statistique, montrent un rapport H/L proche des déstabilisations historiques en Limagne tandis que la morphométrie des blocs confirme ses caractéristiques avalancheuses, comparable à celle de Tutupaca. Le contexte géologique spécifique au milieu volcanique étudié et à la faille de Limagne doit être précisé. Ce projet contribuera à contraindre l'aléa mobilisation et fracturation des mégablocs.

Mots-Clés : géomorphologie, analyse d'images, avalanche de débris, mégablocs, Massif Central

Intervenants

Auteur correspondant : Karine Bernard ¹, Francisco Nunez-Trezeguet ^{*2}, Tiffany Becar ^{*2}



Monitoring sismique et électrique d'un glissement-coulée (Pont-Bourquin, Suisse)

Grégory Bièvre ¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, ISTerre, 38000 Grenoble, France

Les méthodes géophysiques en 2D et 3D sont utilisées depuis plusieurs années pour suivre temporellement l'évolution des glissements de terrain. Les méthodes sismiques sont sensibles aux variations de rigidité du matériau tandis que les méthodes électriques sont sensibles, notamment, aux variations hydrologiques. Dans ce travail, nous avons testé le suivi temporel sismique passif (bruit de fond ambiant) et électrique (résistivité) d'un glissement-coulée (le glissement de Pont-Bourquin dans les Alpes suisses) avec des vélocimètres (3 couples de capteurs) et des électrodes (36 capteurs) situés immédiatement à l'extérieur de la zone instable. Les données ont fourni des séries temporelles (4 ans pour la sismique et 1 an pour l'électrique) qui ont ensuite été corrélées aux paramètres environnementaux (pluie, température, etc.). Les résultats indiquent que, malgré un manque de sensibilité dans la zone instable en raison du dispositif de suivi sans capteur sur la zone instable, les deux méthodes sont sensibles aux variations environnementales. Les corrélations fournissent des informations comparables entre sismique et électrique et suggèrent que les deux paramètres physiques sont fortement affectés par les précipitations, avec un effet qui ne dure pas plus de 2 à 3 jours. Ces résultats indiquent que les couches superficielles (premiers mètres) ont une influence majeure sur les mesures géophysiques. Plus généralement, ces résultats, ainsi que de nombreux travaux publiés, remettent en question la valeur ajoutée de l'électrique notamment pour suivre les glissements de terrain à des profondeurs supérieures à celle de la nappe phréatique superficielle.

Mots-Clés : monitoring, géophysique, paramètres environnementaux, glissement-coulée



Analyse multi-proxy de forages dans des argiles glacio-lacustres quaternaires (glissement d'Avignonet, Trièves, France)

Grégory Bièvre ¹, Christian Crouzet ¹

¹Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, Univ. Gustave Eiffel, ISTERre, 38000 Grenoble, France

Le glissement de terrain d'Avignonet (~2 km²) dans la région du Trièves (massif subalpin) est constitué de sédiments paraglaciers du Quaternaire parmi lesquels des couches de till, d'argiles glacio-lacustres et d'alluvions fluviales imbriquées. De nombreux forages (destructifs et carottages) ont été réalisés au milieu des années 1980 et au milieu des années 2000 pour évaluer les conditions géologiques et géotechniques de la partie habitée, au sud, de ce glissement de terrain lent (quelques mm/an à quelques dizaines de cm/an). Les paramètres obtenus par ces reconnaissances variées sont très hétérogènes et rendent l'interprétation difficile. La diagraphie gamma-ray, ainsi que les essais de susceptibilité magnétique et les essais mécaniques simples sur les carottes ont permis de distinguer les différentes unités lithologiques et géotechniques. La résistance mécanique obtenue à partir de l'enregistrement des paramètres de forage a été corrélée aux carottes. Leur combinaison avec les observations à l'affleurement a été utilisée pour délimiter les unités lithologiques et positionner les surfaces de rupture.

L'analyse conjointe de l'ensemble des données révèle l'intrication d'unités sédimentaires variées. Deux anciens glissements de terrain, de plusieurs dizaines de mètres de large, ont en outre été identifiés au sein du grand glissement d'Avignonet. Tous les résultats indiquent une grande complexité lithologique et hydrogéologique qui a un impact sur la dynamique du glissement de terrain. Ce travail montre l'intérêt d'une approche multi-proxy dans les études impliquant des unités sédimentaires du Quaternaire. La méthodologie développée ici pourrait être appliquée à d'autres sites ayant des contextes paléoenvironnementaux présentant initialement un compactage sédimentaire, tels que les environnements lacustres ou côtiers.

Mots-Clés : glissement de terrain argileux, sédiments quaternaires para-glaciaires, compaction sédimentaire, forages, Alpes françaises occidentales



Rockslide distribution and cliff retreat: discrete element simulations

Vincent J. Langlois ^{*1}

¹ Laboratoire de Géologie de Lyon: Terre, Planètes, Environnement – France

The survey of cliffs through terrestrial laser scanning or photogrammetry now makes it possible to identify rockfalls of small volume, and to investigate their distribution in size and time. We propose a numerical approach to this issue, based on discrete elements simulations. We model the dynamics of an assembly of particles initially bound together by cohesive beams, which can be irreversibly broken when strain exceeds a given threshold. This method has already been applied successfully to the modeling of the spontaneous collapse of a brittle column [Langlois *et al.*, 2015].

We here extend this model in order to compute the long-term behaviour of a stable rock mass, whose cliff is progressively altered by randomly weakening some of the cohesive beams at each timestep. This allows us to investigate the properties of the rockfalls that are spontaneously and stochastically triggered. We study the retreat of the cliff and the dynamics of its profile, and predict the distribution of rockslide events in volume and time, in relation to the thickness and dip of strata. The results are then compared to available field data.

Mots-Clés : cliff dynamics ; rockfalls ; discrete element simulations



Etude expérimentale du lien entre molards et pergélisol

Meven Philippe^{*1}, Susan J. Conway¹, Marianne Font-Ertlen², Costanza Morino³,
Olivier Bourgeois¹

¹Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes – France

²Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière de Caen – France

³Laboratoire Environnements Dynamiques et Territoires de la Montagne (EDYTEM) - France

Le pergélisol des milieux périglaciaires est très sensible aux variations de températures dues au changement climatique (Hinzman et al., 2005). Sa dégradation au niveau des pentes est donc propice aux glissements de terrain, événements dangereux pour les populations locales. Il est donc important d'identifier les zones où le pergélisol est présent. Or peu de morphologies témoignent de la présence de pergélisol discontinu.

Les molards sont des cônes de débris observables dans les dépôts de glissements de terrain. Ils ont été identifiés par Morino et al. (2019) comme étant des blocs de pergélisol déplacés par des glissements de terrain, puis ayant subi la fonte de la glace qui les cimentait. Un des objectifs du projet est donc d'utiliser les molards pour localiser les zones de pergélisol discontinu et comprendre la dynamique des glissements. Les molards étant très peu étudiés, nous faisons des expériences de modélisation analogique afin de caractériser les gammes de granulométrie et de teneur en glace, ainsi que les configurations de glace nécessaires à la formation des molards. La formation et l'évolution des molards dépendent de ces paramètres, qui sont actuellement inconnus. Les expériences sont réalisées au laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière de Caen, sur la plateforme expérimentale CryoEx. Elles sont des modélisations analogiques de blocs de pergélisol par des mélanges de sédiments et d'eau, gelés en cubes pluridécimétrique puis fondus. Initialement nous avons fait varier la granulométrie du sédiment, puis nous ferons varier sa teneur en glace. Les différents processus de dégradation des blocs sont observés et notés. Leur morphologie est suivie par photogrammétrie avec des caméras programmées pour faire des acquisitions à intervalles réguliers. Leur évolution thermique est également enregistrée par des thermocouples inclus dans les blocs.

Remerciements : les auteurs remercient l'ANR pour le financement du projet ANR-19-CE01-0010 PERMOLARDS.

Mots-Clés : molards, pergélisol, glissements, modélisation analogique



Évaluation du comportement hydrogéologique d'un glissement de terrain côtier profond par approche pluridisciplinaire

Guillaume Thirard^{1,2}, Gilles Grandjean², Yannick Thiery^{*2}, Olivier Maquaire¹, Benjamin François², Candide Lissak¹, Stéphane Costa¹

¹ NORMANDIE UNIV, UNICAEN, CNRS, LETG, 14000 CAEN, France

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 45060 Orléans, France

Entre Deauville et Honfleur (Calvados, Normandie), le littoral est affecté par quatre grands glissements profonds, à la structure complexe. Ces derniers sont caractérisés par des alternances sédimentaires et terrigènes et une sensibilité à la rupture et aux coulées boueuses. La présente étude vise à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du Cirque des Graves (Villerville), qui est la plus étendue de ces quatre instabilités (47 ha). La circulation d'eau y est un facteur déclenchant déterminant, avec des accélérations dépendantes des niveaux de nappes.

L'objectif est de mettre en évidence le fonctionnement interne de ce site à partir d'un ensemble hétérogène de données géomorphologiques, géologiques et hydrologiques. Pour compléter ces connaissances initiales, de nouvelles acquisitions ont été réalisées pour renforcer nos hypothèses au moyen de géophysique passive et des paramètres physico- chimiques des eaux de surface. L'analyse conjointe de levés de tomographie de résistivité électrique (ERT) avec des données de polarisation spontanée (PS) a permis de corréler des informations électrocinétiques mesurées en surface à des gammes de valeurs de résistivité en profondeur, et ainsi de déterminer l'orientation des écoulements et leurs liens avec la lithostructure.

Cette étude met notamment en évidence : (1) une division de la dynamique interne en trois secteurs, avec une dissociation entre les zones est, centrale et ouest ; (2) une dynamique interne plus profonde au centre et à l'ouest, comme suggéré par la géologie et la géophysique ; (3) une décharge préférentielle de la nappe continentale en amont de la zone centrale du glissement de terrain.

Ces travaux tendent à démontrer que sur la base de connaissances initiales disponibles sur de nombreux glissements de terrain, la compréhension du fonctionnement hydrogéologique peut être améliorée sur un site complexe par quelques acquisitions ciblées et l'analyse croisée de données issues de méthodes complémentaires.

Mots-Clés : glissement de terrain ; hydrogéologie ; géomorphologie ; géophysique ; aquifère ; Normandie



T5.4 Tectonique active : la sismicité de la France et le séisme de Teil



Séisme du Teil (11.11.2019) : Structuration géologique 3D du sous-sol

Allanic Cécile^{1*}, Paquet Fabien¹, Bitri Adnand¹, Raucoules Daniel¹, Marc Stéphane¹,
CaparLaure¹, Briaïs Justine¹, Lasseur Eric¹, Fauchadour Jean-Christophe²

¹ BRGM Bureau de Recherches géologiques et minières - France

² LAFARGEHOLCIM CEMENTS - France

Le 11 novembre 2019 à 11 h 52, dans la vallée du Rhône, en Ardèche, les habitants du village du Teil et des alentours sont violemment secoués durant 5 à 6 secondes par le plus fort tremblement de terre enregistré sur le territoire métropolitain ($M_w=4.9$) depuis celui qui détruisit presque complètement le village d'Arette, dans les Pyrénées, en 1967. Notre étude porte sur la structuration géologique 3D du sous-sol du secteur du Teil où s'est produit ce séisme. Nous avons compilé l'ensemble des données disponibles à ce jour, à savoir les données cartographiques, les données de forages profonds, les données sismiques, et les observations bibliographiques. Cette compilation nous a permis d'identifier certaines acquisitions complémentaires à conduire afin de compléter et valoriser ce jeu de données (retraitement des lignes sismiques anciennes, investigations structurales de terrain, nouvelles acquisitions sismiques, analyses interférométriques). Ces approches ont fait non seulement l'objet d'analyses des résultats propres à chaque thématique mais également d'une phase de mise en cohérence et de synthèse via l'approche de modélisation géologique 3D, qui intègre tous ces résultats.

Les déformations identifiées attestent, sur cette zone, de la réactivation en transpression des structures héritées depuis au moins le début du Miocène (23 Ma). Bien que le temps de retour des séismes majeurs apparaisse bien supérieur à la période couverte par la sismicité historique (et instrumentale) dans ce domaine intraplaque, il existe divers éléments qui convergent afin de requalifier l'aléa sismique de ce secteur à forte vulnérabilité humaine et industrielle.

Mots-Clés : Teil; Analyses structurales; Interférométrie; Sismique; modélisation géologique 3D



3D hydraulic and mechanical constraints on the 5 magnitude earthquake of 11 November 2019 at Le Teil (France)

André Burnol ^{*1}, Antoine Armandine Les Landes ¹, Simon Lopez ¹, Philippe Pébay ², Daniel Raucoules ¹, Michael Foumelis ¹, Hideo Aochi ¹, Julie Maury ¹, Cécile Allanic ¹, Adnand Bitri ¹, Behrooz Bazargan-Sabet ¹

¹ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

² EREDIO - France

On 11 November 2019, a 5 magnitude earthquake occurred in southeast France at Le Teil, close to the Rhone river. This seismic event is the strongest earthquake ever felt in France since the Arette (Pyrenees) earthquake in 1967.

By using an updated 3D geological model, we focus this work on the comparison of the effect of hydraulic recharge linked to the infiltration of meteoric water in the period preceding the earthquake and the effect of the exploitation of a large limestone quarry in the vicinity of the epicenter.

First, we describe the fault system from the updated geological model and the boundary conditions that are used to calculate the pressure variations at depth using a three-dimensional (3D) double porosity double permeability model. The movement of moisture in partially-saturated media is then simulated by the BRGM Compass code using the surface soil moisture data acquired by the SMOS satellite between 2010 and 2019 as surface boundary conditions and the Rhône river as edge boundary conditions.

The main result of these simulations is that at the intersection of the faults, the calculated increase in pore fluid pressure is maximum just before the earthquake of November 11, 2019. A sensitivity study carried out on the hydraulic parameters allows us to estimate that at about 1200 m depth, the overpressure linked to the hydraulic recharge of the fault system is between 0.4 and 0.6 MPa. Finally, we compare the variation in normal stress linked to a mechanical discharge from the surface quarry and the hydraulic overpressure linked to a meteoric water recharge, by choosing the same structural model.

The comparison shows that if this event is triggered, a hydraulic triggering by heavy rainfall is much more likely than the hypothesis of a mechanical triggering due to the mass withdrawal.

Mots-Clés : Le Teil, earthquake, hydraulic recharge, fault system, Compass, 3-DEC, Surface Soil Moisture, SMOS, quarry



Campagne post-sismique GNSS dans la zone épiscopale du Teil : premiers enseignements

Mohamed Chlieh¹, Estelle Hannouz¹, Marianne Métois^{*2}, Christian Sue^{1,3}, Andrea Walpersdorf¹, Michel Bouchon¹, Zahra Mousavi⁴, Ildut Pondaven¹, Juan Carlos Villegas⁵

¹ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, Univ. Gustave Eiffel, ISTERre

² Laboratoire de Géologie de Lyon, Université de Lyon, Université Lyon 1, ENS de Lyon, CNRS, UMR5276 LGL-TPE

³ CNRS UMR6249, Université Bourgogne Franche-Comté

⁴ Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Iran

⁵ Instituto Geofísico del Perú

Le séisme du Teil du 11/11/2019 et de magnitude Mw 4.9 a causé des dégâts importants dans la région de Montélimar, et a mobilisé largement la communauté scientifique travaillant sur le risque et l'aléa sismique (Cornou et al. 2020). Les premiers interférogrammes InSAR ont rapidement permis d'identifier une rupture principale de surface le long de la faille dite de « La Rouvière » (Ritz et al. 2020), ancienne faille normale de la marge Cévenole reprise en compression. Inhabituellement superficiel pour la métropole, localisé sur une structure non répertoriée comme faille active (Jomard et al. 2017) et à proximité d'une carrière majeure, le mouvement co-sismique n'a pas pu être enregistré par les réseaux GNSS continus français trop lâches dans cette région (les stations permanentes des réseaux RENAG et RGP les plus proches étant entre 40 et 60 km de distance de l'épicentre). Aucun réseau de campagne mesuré préalablement n'existe à moins de 30 km de la zone épiscopale (réseau de campagne des Alpes, Walpersdorf et al. 2018), à l'exception des réseaux de nivellement de l'IGN.

Une mission post-sismique a été organisée 4 jours après le choc principal dans l'optique d'installer des stations GNSS semi-permanentes au plus proche de la faille afin d'enregistrer d'éventuelles répliques ou glissements postsismiques superficiels. 4 stations ont été installées en champ très proche de la rupture (1 à 2 km) entre le 15/11 et le 03/12 et sont aujourd'hui opérationnelles. Nous présentons ici les séries temporelles haute fréquence pour les premiers jours d'installation et journalières sur les 6 premiers mois de mesure traitées suivant différentes stratégies. Aucune réplique majeure ou mouvement post-sismique franc ne semble avoir été enregistré. À terme, certaines stations pourraient intégrer le réseau RENAG pour assurer un suivi long-terme de la zone et combler cette lacune d'observations. Nous dressons un premier bilan de cette mission géodésique post-sismique inédite.

Mots-Clés : Le Teil, GNSS, géodésie, post-sismique



Comportement dynamique et vulnérabilité du bâti ancien à la suite du séisme du Teil (11/11/19). Cas d'étude de la cathédrale de Viviers et du château de Saint Thomé (Ardèche).

Andy Combey ^{*1}, Diego Mercerat ², Laurence Audin ³, Christophe Voisin ⁴,
IldutPondaven ⁴, Cécile Cornou ³

¹ PhD CDP Risk, ISTerre/Université Grenoble Alpes – France

² CEREMA Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement – France

³ ISTerre/Université Grenoble Alpes – IRD – France

⁴ ISTerre/Université Grenoble Alpes – CNRS – France

Le séisme du Teil du 11 novembre 2019 ($M_w=4.9$) représente un épisode sismique exceptionnel en France métropolitaine par son ampleur (étendue et sévérité des dégâts dans plusieurs communes ardéchoises) et le caractère multidisciplinaire des programmes de recherches qui en ont découlé. Le bâti civil comporte un grand nombre de constructions traditionnelles (maçonneries non renforcées) et historiques de classe A qui ont souffert de nombreux dommages caractéristiques. A l'aune de l'évènement sismique du Teil, un effort académique conséquent semble aujourd'hui nécessaire afin de mieux évaluer les caractéristiques vibratoires du patrimoine local. En engendrant une rupture de surface, ce séisme représente en effet une opportunité unique de reconsidérer l'aléa sismique régional.

Notre équipe de recherche associant les équipes d'ISTerre et du CEREMA a ainsi décidé d'instrumenter trois édifices à valeur historique durant la crise sismique. Deux édifices présentent un intérêt tout particulier et ferons l'objet d'un plus ample développement : la tour de la cathédrale de Viviers et le château Beaulieu à Saint Thomé. Situés dans des environnements géologiques distincts (promontoire rocheux, plaine alluviale), ces deux édifices ont été équipés respectivement de nodes pour la tour et d'un vélocimètre/accéléromètre Guralp pour le château.

Cette initiative a pour intérêt majeur d'avoir été conduite très rapidement après la secousse principale et d'avoir abouti à un suivi de moyen-terme (entre 1 et 2 mois). Il s'agit d'une instrumentation inédite et unique dans la région qui fut l'occasion d'enregistrer non seulement la réponse du bâti au bruit sismique mais également son comportement face aux diverses répliques. Au travers des deux cas d'études nous souhaitons ainsi discuter de l'existence de potentiels effets de site pour ces bâtiments historiques hauts et évaluer les facteurs principaux affectant la vulnérabilité du bâti en question. Les conséquences matérielles de la crise plaident pour une réévaluation du risque sismique dans cette région traversée par le complexe de failles cévenoles.

Mots-Clés : Vulnérabilité, Bâti historique, Bruit sismique, Le Teil earthquake



Up to date geodetic velocity field of the Belledonne region (Western Alps, France)

Estelle Hannouz^{*1}, Andrea Walpersdorf¹, Christian Sue^{1,2}, Margot Mathey¹,
Stéphane Baize³, Anne Lemoine⁴

¹ Institut des sciences de la Terre (ISTerre), Grenoble- France

² Chrono-Environnement, Besançon - France

³ Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) - France

⁴ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

The Belledonne region, located on the western edge of the Alps, behaves as a deformation transfer zone between the inner part of the western Alps, whose geodesy and seismicity show extensional deformation, and its shortening surrounding basin (the Rhône Valley). Seismological and geodetic networks are less dense and younger in the latter area, which makes it more difficult to characterize its deformation. These two regions nevertheless have a moderate historical and instrumental seismicity. A large part of these earthquakes is concentrated around the Belledonne range and accommodated by the active NE–SW Belledonne fault, located at the western foot of this chain. The fault characteristics, such as its connection at depth with surrounding fault systems (e.g. Cléry fault), still need better constraints. The dense seismological network present in the Alpine region has made it possible to highlight its dextral strike-slip kinematics. To complete these observations, we present here an update of the geodetic velocity field around this fault from GNSS data recorded over the last two decades.

To do so, we first computed daily positions from about forty European IGS stations and from French RENAG stations on a period of 22 years (from 1997 to 2019) by using a double-difference processing with the GAMIT software (Herring et al. 2015). Then, we constrained a velocity field with the GLOBK software with respect to the fixed European plate. We finally analyzed the updated velocity field around our area of interest related to this fixed referential.

Our results show a consistency with the dextral strike slip mechanism observed by the current seismicity. Methodological prospects concern the expected decrease of uncertainty both on daily positions and on the velocity field thanks to the increase of recordings through time. We aim at confirming and precisising the uplift observed by seismicity and the previous geodetic studies on the Belledonne area.

Mots-Clés : Geodesy – Active tectonic – French Alps

^{*}Intervenant



Le rôle de l'héritage structural sur la sismicité du Cotentin : l'apport de l'analyse terre-mer.

Tassadit Kaci ^{*,1}, Anne Duperret ¹, Yann Méar ², David Graindorge ³, Bernard Le Gall ³, Julie Perrot³, Stéphane Baize ⁴

¹ Normandie Univ, UMR CNRS 6294 LOMC, UNILEHAVRE -France

² EA 4253 LUSAC, CNAM-INTECHMER, Cherbourg-en-Cotentin-France

³ IUEM, UMR CNRS 6538, Géosciences Océan, Université de Bretagne Occidentale, Plouzané-France

⁴ IRSN. BERSSIN, BP17, 92262 Fontenay-aux-Roses, France

Le NW du Domaine Nord-Armoricain (DNA) exposé dans le Cotentin et en bordure du Golfe Normano-Breton (Baie de St Malo) appartient à la ceinture orogénique cadomienne NW européenne, profondément reprise dans les déformations (plis et chevauchements à vergence sud) hercyniennes. Cet ensemble présente une sismicité régionale, associée à des séismes peu profonds, qui nécessite d'être étudiée dans ce contexte de déformations intra-socle polyphasées.

L'un des objectifs du projet COCOTIER (INSU/TELLUS/SYSTER) initié en 2020, consiste à vérifier l'importance de l'héritage structural dans la distribution et la géométrie du réseau de failles sismogènes du NW du DNA, par le biais d'une étude structurale terre-mer.

L'ensemble des données bathymétriques haute-résolution existantes au NW du cap de la Hague (campagnes SHOM et du N/O Haliotis BATHAGUE 2008, 2010 et COCOTEC 2019) ont été fusionnées et traitées pour obtenir une topo-bathymétrie continue terre-mer, complétée par les données géologiques disponibles.

Les catalogues de sismicité instrumentale (RéNaSS, LDG, SI-Hex) et historique (FCAT-17, SisFrance) indiquent une sismicité non négligeable, qui a atteint une magnitude M_L de 4.9 (M_w de 4) en 2014 au large de l'île de Jersey, ainsi que le séisme historique de Saint Héliier en 1926, d'intensité MSK VI-VII.

La compilation de ces données montre un alignement partiel de séismes le long de discontinuités cadomiennes (N70°E) recoupant le Sud Cotentin et dans le Nord Trégor, ainsi que dans le prolongement de plis (synclinal de Siouville) ou de chevauchements hercyniens du Nord Cotentin. Par ailleurs, une activité très récente apparaît en mer, en essais remarquables au SW de l'île de Jersey, incluant le séisme du 14 juillet 2014 (M_w de 4), qui semble localiser une structure N150°E d'âge hercynien, en cisaillement.

Enfin, le séisme enregistré le 01 février 2020 au large du cap de la Hague (M_L 2.4) se situe le long d'un accident hercynien N150°E (la faille de la Hague), parfaitement visualisé sur la bathymétrie HR par un abrupt net de 25-40m, mettant en contact le socle granitique cadomien et les séries crétacées de la fosse de la Hague.

Mots-Clés : Faille active, Cotentin, Héritage structural, sismicité, bathymétrie



Récurrance des forts séismes sur la côte Ligure (France-Italie).

Christophe Larroque^{*1}, Oona Scotti², Françoise Courboux¹, Jenny Trévisan¹

¹ Géoazur, Université Côte d'Azur-CNRS, France

² Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire (IRSN), France

La France métropolitaine est un domaine continental stable soumis à une sismicité modérée. Cependant des séismes forts ($M_w > 6,5$) se sont produits dans les temps historiques. La région située entre Nice et Gênes a ainsi subi un tel séisme (M_w 6,7-6,9) le 23 février 1887.

Dans les régions continentales stables, le cycle sismique des failles actives a été récemment remis en cause en se fondant sur l'hypothèse que les processus de chargement des failles et de déclenchement des séismes ne seraient pas uniquement liés à la tectonique des plaques mais feraient intervenir des processus locaux (érosion, déglaciation, circulation de fluide).

Bien que le séisme du 23 février 1887 soit le seul séisme fort connu sur le système de failles Ligure, nous proposons de discuter la période de récurrence possible d'un séisme de M_w 6,8 à partir des données sismologiques et géologiques disponibles.

Une première estimation des périodes de récurrence est obtenue par l'analyse de la sismicité instrumentale et des courbes fréquence/magnitude de Gutenberg-Richter à partir du catalogue LDG pour la zone sismotectonique nord Ligure. Les valeurs ainsi obtenues varient entre 2000 et 6000 ans suivant les hypothèses. Nous proposons une deuxième estimation à partir de la modélisation du taux de sismicité en utilisant le code SHERIFS et le catalogue SHARE et obtenons cette fois des valeurs entre 3500 et 8500 ans. Nous comparons enfin ces valeurs à celles obtenues à partir des données tectoniques et géodésiques qui sont comprises entre 1500 et 3500 ans.

L'ensemble de ces résultats conduit à une estimation d'un temps de récurrence pour un séisme M_w 6,8 sur le système de failles Ligure d'au maximum 8500 ans et au minimum 1500 ans. Suivant les approches, cet intervalle reste large mais l'analyse géologique de la zone permet de le réduire.

Mots-Clés : modélisation du taux de sismicité, temps de récurrence, marge Ligure



Localisation du choc principal et des répliques du séisme du Teil (2019/11/11, Mw 4,9) dans le contexte géologique de la bordure du bassin du Sud-Est (France).

Christophe Larroque^{*1}, Maxime Godano¹, Bertrand Delouis¹, Françoise Courbouloux¹, Stéphane Baize², Jean-François Ritz³, Elif Oral¹ et Jean-Paul Ampuero¹.

¹ Géoazur Université Côte d'Azur-CNRS, France

² Institut de Recherches et de Sûreté Nucléaire (IRSN), France

³ Géosciences Montpellier, Université de Montpellier-CNRS, France

La vallée du Rhône a été fortement secouée par un séisme de magnitude 4,9 le 11 novembre 2019. Ce séisme est typique des événements modérés qui se produisent régulièrement en France métropolitaine. Cependant il présente des caractéristiques, en particulier la rupture de la surface et une très forte accélération du sol pour cette magnitude, qui incitent la communauté à revoir les implications de tels événements dans l'évaluation de l'aléa.

L'une des caractéristiques de ce séisme est la très faible profondeur du foyer (< 3 km). Toutefois, les stations sismologiques permanentes et temporaires existantes au moment du séisme ne permettent pas à elles seules de localiser précisément ni l'épicentre ni la profondeur du foyer du séisme. Afin de mieux préciser l'hypocentre, nous avons analysé l'impact de l'inclusion ou de l'absence des stations post-sismiques sur la localisation d'une réplique et en considérant les hypocentres compatibles avec la géométrie de la faille responsable du séisme. Une autre caractéristique de ce séisme concerne le faible nombre de répliques enregistrées en dépit des 45 sismomètres installés dans la semaine qui a suivi le séisme. Les analyses standards de recherche de séismes dans les signaux continus de mi-novembre 2019 à mi-janvier 2020 n'ont pu détecter initialement qu'une petite dizaine de répliques de magnitude ≥ 1.8 . Ce nombre a significativement été augmenté par l'utilisation d'une méthode de type « Template Matching » qui a permis au final de détecter 130 répliques de magnitude ≥ -1.5 . Ces répliques ont ensuite été finement localisées par la méthode des doubles-différences.

Nous confrontons la localisation du foyer et des répliques à la géologie de la zone de faille de la Rouvière. La rupture s'est initiée dans la couverture sédimentaire mésozoïque, nous discutons la localisation précise du foyer dans la lithologie et sa relation avec la faille ainsi que la distribution des répliques dans le mur versus le toit de la faille.

Mots-Clés : séisme du Teil, faille de la Rouvière, profondeur du foyer, répliques, template matching



Aléa sismique dans la région du Teil : Apport de la géophysique dans la caractérisation multi-échelles des failles du faisceau NE cévenol

Kevin Manchuel*¹, Sylvain Pouliquen ¹, Florian Miquelis ², Christophe Vergniault¹,
Pierre Arroucau ¹, Vincent Bremaud ¹

¹ EDF-DIPNN-DI-TEGG, France

² CdP Consulting, France

Le séisme du Teil s'est produit sur la faille de la Rouvière, qui appartient à la terminaison Nord-Est du faisceau de failles des Cévennes. La connaissance des failles de ce faisceau, en termes de localisation, de géométrie, d'histoire cinématique et d'âge de dernier mouvement permettra une meilleure prise en compte de ces structures dans les études d'aléa sismique de la région.

Une approche graduée, visant à zoomer progressivement sur les structures tectoniques a été mise en place, dans la zone épacentrale du séisme du Teil et immédiatement au Nord. Des acquisitions géophysiques ont été réalisées à différentes échelles dans le but d'obtenir des images des différentes failles du faisceau, à la fois en profondeur (~60 km de sismique réflexion Haute-Résolution – jusqu'à 3 km de profondeur) et en proche surface (sismique réflexion UHRS en ondes P et S pour les premières dizaines de mètres et GPR pour les premiers mètres, au niveau de 5 sites localisés au droit des failles de La Rouvière et de Marsanne). En domaine intraplaque, ces données représentent un préalable nécessaire aux études paléosismologiques, en permettant de localiser précisément les failles dont l'expression morphologique en surface a pu être effacée avec le temps.

Concernant la sismique HR, les résultats obtenus à l'issue d'une première campagne d'acquisition ont mis en évidence des difficultés d'imagerie liées aux terrains urgoniens affleurant, qui agissent comme un masque sur le signal. Les résultats obtenus in fine, après ajustement du design d'une seconde campagne aux conditions géologiques locales, permettent d'imager les failles du faisceau cévenol en profondeur et soulignent leur géométrie listrique et leur enracinement vers 3 km de profondeur dans un niveau triassique. Les données de sismique UHRS devraient permettre d'imager les failles en très proche surface et ainsi contraindre au mieux la localisation de nouvelles tranchées paléosismologiques (notamment au niveau de la faille de Marsanne pour le moment).

Mots-Clés : Faisceau cévenol, failles, sismique HR, sismique UHRS, aléa sismique, paléoséisme.



Réactivation lors du séisme du Teil (11/11/2019, $M_w4.9$) : modèle géologique 3D et série temporelle InSAR

Léo Marconato ^{*1}, Philippe-Hervé Leloup ¹, Cécile Lasserre¹, Romain Jolivet ^{2,3}, Séverine Caritg ⁴, Raphaël Grandin ⁵, Marianne Métois ¹, Olivier Cavalié ^{1, 6}, Laurence Audin ⁷

1 : LGL-TPE

Univ Lyon, Univ Lyon 1, ENSL, CNRS, LGL-TPE, F-69622, Villeurbanne, France

2 : Laboratoire de géologie, Ecole Normale Supérieure

Laboratoire de Géologie, Département de Géosciences, École Normale Supérieure, PSL Université, CNRS UMR 8538, Paris, France

3 : BRGM

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)

4 : Institut de Physique du Globe de Paris

Université de Paris, Institut de physique du globe de Paris, CNRS, F-75005 Paris, France

5 : Géoazur

Université Côte d'Azur, IRD, CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur, Géoazur, France

6 : Institut des Sciences de la Terre

Institut National des Sciences de l'Univers, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR219, Université Grenoble Alpes, Université Gustave Eiffel, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5275, Université Savoie Mont Blanc

Le séisme du Teil ($M_w4.9$) a frappé en 2019 le Sud-Est de la France, près de Montélimar, causant d'importants dégâts matériels dans une région de faible déformation. Les études terrain, de télédétection et de sismologie qui ont suivi ce séisme ont révélé qu'il avait produit un glissement chevauchant très superficiel, rompant la surface sur une longueur d'environ 5 km. Nous avons étudié plus en détail ce séisme en combinant cartographie géologique sur le terrain, modélisation géologique 3D, série temporelle InSAR et inversion du glissement co-sismique.

À partir de données stratigraphiques et structurales collectées autour de l'épicentre, nous avons premièrement construit un modèle géologique 3D de la zone de rupture. Celui-ci inclut la géométrie des couches géologiques et des failles principales, dont la faille normale Oligocène de la Rouvière qui a rompu lors du séisme. Nous avons ensuite calculé une série temporelle InSAR en utilisant une année de données Sentinel-1 entre janvier 2019 et janvier 2020. L'analyse des déplacements de surface projetés dans la ligne de visée ne révèle pas de déformation pré- ni post-sismique. Nous avons extrait de la série temporelle une carte des déplacements de surface co-sismiques, montrant un déplacement relatif maximal d'environ 16 cm en ligne de visée. À partir de ces données, nous avons inversé la distribution du glissement sur la géométrie de la faille de la Rouvière définie à partir du modèle géologique 3D. Ce modèle confirme la réactivation de la faille de la Rouvière, et contraint le pendage de la faille entre 55 et 60°. La distribution de glissement permet de distinguer deux maxima de glissement quasiment purement inverse atteignant 30 et 24 cm de glissement à environ 500 m de profondeur. Enfin, en comparant la géologie 3D et la distribution de glissement, nous discutons de l'impact probable de la structure géologique pré-existante sur la propagation de la rupture lors du séisme.

Cette étude apporte de nouveaux éléments dans l'étude de ce séisme singulier, et appelle à une révision du risque sismique autour des nombreuses failles semblables à la faille de la Rouvière le long du système de faille des Cévennes, souvent situées dans des zones vulnérables.

Mots-Clés : séisme intracontinental, modèle géologique 3D, série temporelle InSAR, inversion du glissement



Variations temporelles de la sismicité en France métropolitaine, mythe ou réalité ?

Frédéric Masson ^{*1}, Stéphane Mazzotti ², Hervé Jomard ³

¹ Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre – Université de Strasbourg - France

² Géosciences Montpellier – Université de Montpellier et CNRS - France

³ Bureau d'évaluation des risques sismiques pour la sûreté des installations - Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire - France

Au cours des deux dernières décennies, de nouvelles études en géologie, sismologie et géodésie ont mis en évidence que, bien que contribuant aux contraintes à l'échelle continentale, la tectonique des plaques n'est probablement pas le principal moteur de la déformation actuelle et de la sismicité en France métropolitaine. D'autres processus doivent être envisagés, tels que l'énergie potentielle de la topographie, l'érosion Quaternaire ou le réajustement isostatique post-glaciaire. Trois axes de recherche doivent être développés pour mieux caractériser la sismicité, les taux de déformation et les processus associés en France métropolitaine :

- 1) la sismicité historique et la macrosismicité, notamment concernant les estimations des magnitudes de moment ;
- 2) la déformation mesurée par géodésie ;
- 3) un modèle sismotectonique intégrant données géologiques, sismologiques et géodésiques à l'aide de modèles numériques.

Dans cette présentation, nous mettrons principalement l'accent sur le premier axe. En effet, la sismicité doit être étudiée en combinant des données historiques et instrumentales dans des catalogues sismiques homogènes. Cependant, l'estimation de la magnitude des séismes historiques à partir de données macrosismiques est un processus complexe. L'évolution temporelle du taux de moment sismique annuel pour la période 400-2010, basée sur le catalogue FCAT-17 (Manchuel et al., 2018), montre soit une surestimation systématique de la magnitude des séismes historiques (équivalente à 0,5 point de magnitude), soit une sous-estimation systématique (de 0,5 point de magnitude également) des magnitudes M_w dans SI-HEX. À l'heure actuelle, aucun élément ne permet de choisir l'une de ces deux options. Par ailleurs, l'observation d'une période de calme sismique d'environ 50 ans (depuis 1960 environ) et qui n'a pas été observée au cours des 500 dernières années, constitue également un élément à prendre en compte.

Les améliorations du catalogue des séismes historiques et les conversions en magnitudes M_w constituent clairement une exigence majeure pour les études futures.

Mots-Clés : Sismicité, France, Processus intraplaques, Aléa sismique



Rupture de surface et réactivation d'une faille peu profonde lors du séisme du Teil 2019, France (11-11-2019, Mw 4.9)

Jean-François Ritz ^{*1}, Stéphane Baize ², Matthieu Ferry ¹, Christophe Larroque ³,
Laurence Audin ⁴, Bertrand Delouis ³, Emmanuel Mathot ⁵

¹ Géosciences Montpellier, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France

² IRSN, Institute of Radiological protection and Nuclear Safety, Fontenay-aux-roses, France

³ Géoazur, Univ. Côte d'Azur, CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur, IRD, Valbonne, France

⁴ ISTerre, Univ. Grenoble Alpes, CNRS, IRD, Grenoble, France

⁵ Terradue Srl, Rome, Italy

Le 11 novembre 2019, le tremblement de terre du Teil, de magnitude Mw4.9, a secoué la vallée du Rhône, une région densément peuplée avec de nombreuses installations industrielles dont plusieurs centrales nucléaires. Les données sismologiques indiquent que le séisme s'est produit sur une faille inverse orientée NE-SO avec une profondeur focale très faible (~ 1 km). Les observations InSAR indiquent un soulèvement du bloc SE (jusqu'à 15 cm) le long d'une discontinuité orientée NE-SO de ~ 5 km de long et correspondant à la faille de la Rouvière, une ancienne faille normale héritée de l'extension Oligocène. L'analyse de terrain a permis de découvrir une vingtaine d'évidences de ruptures de surface, la plupart située sur le tracé de la faille, plusieurs montrant des caractéristiques cinématiques cohérentes avec les données sismologiques et les données InSAR. L'ensemble de ces observations permet de conclure à la réactivation de la faille de La Rouvière située au sein du système de failles des Cévennes. L'absence de déformations compressives cumulées dans la morphologie récente, le long de la faille, suggère qu'elle n'a pas cassé depuis plusieurs milliers voire plusieurs dizaines de milliers d'années. Ces observations soulèvent la question du risque de rupture de surface au niveau des autres failles de la terminaison NE du faisceau cévenol, ainsi que dans les autres régions de France métropolitaine qui sont caractérisées, comme dans le cas des Cévennes, par un fort héritage structural et un faible taux de déformation (i.e. $10^{-9} - 10^{-10}$ a⁻¹).

Mots-Clés : Séisme modéré; rupture de surface ; réactivation; faille inverse; Rhône, France métropolitaine



Paléosismologie de la faille de La Rouvière, source inattendue du séisme du Teil (Mw4.9) du 11-11-2019 (Faille des Cévennes, France)

JF Ritz, S. Baize, M. Ferry, E. Hannouz, M. Riesner, L. Bollinger, C. Larroque, L. Audin, K. Manchuel, M. Rizza, H. Jomard, C. Sue, P. Arroucau, J. Billant

Le séisme du Teil du 11 Novembre 2019 s'est produit le long de la faille de La Rouvière (LRF) au niveau de la terminaison NE du système de failles des Cévennes (CFS). Cet événement superficiel (~1 km de profondeur), de magnitude modérée (Mw4,9), a inversé une faille normale oligocène, qui n'était pas cartographiée comme potentiellement active, provoquant une rupture de surface de 5 km de long, associée à un déplacement inverse moyen de 10 cm, et de fortes accélérations du sol. La morphologie le long de la faille ne montrant aucune trace de mouvement inverse cumulé au cours du Quaternaire, la question se posait de savoir si c'était la première fois que la faille était réactivée depuis l'Oligocène. Pour répondre à cette question, nous avons réalisées une étude paléosismique le long de la LRF afin d'analyser et de caractériser le cas échéant, les traces de paléoruptures dans les dépôts quaternaires. Onze tranchées ont été effectuées le long de la section qui a cassée en 2019. Les tranchées ont été creusées dans des dépôts éoliens et des colluvions de pentes qui tapissent l'ancien miroir de faille normale oligocène taillé dans les calcaires barrémiens. Cinq tranchées ont permis de documenter des déformations ante-séisme du Teil. Les âges ^{14}C et OSL réalisés au niveau de «bulks» collectés à partir de la matrice argilo-limoneuse des colluvions, dans deux des tranchées, suggèrent qu'au moins un événement avec rupture de surface s'est produit au cours des derniers 13 Ka. Les âges ^{14}C d'une tranchée effectuée dans la partie Nord de la rupture de 2019, suggèrent que l'avant-dernier événement à cet endroit, s'est produit entre la fin du 15ème siècle et le début du 17ème siècle, avec des caractéristiques cinématiques (sens du mouvement, quantité de déplacement) similaires à l'événement de 2019. Le fait que ces événements ne soient pas conservés dans la morphologie s'explique par la faible quantité de déplacement cosismique et une longue période de retour, cohérente avec le faible taux de déformation ($0,5-1,0 \times 10^{-9} \text{ ans}^{-1}$) mesuré par GPS dans la région. Notre étude montre qu'il est donc fondamental de mener des investigations paléosismologiques plus détaillées en France métropolitaine, notamment le long des grandes zones de failles anciennes.



Projet COYOTES (Comoros & maYotte: vOlcanism, TEctonics and Seismicity) : Aide à la compréhension de la crise sismo-volcanique de Mayotte

Isabelle Thinon ^{1*}, Anne Lemoine ¹, Nathalie Feuillet ², Laurent Michon ³, Sylvie Leroy ⁴
& COYOTES team ⁵

1. BRGM-service géologique national - Orléans France

2. IPGP Paris

3. Université de la Réunion

4. IsTep, Paris

5. ENS Paris, EPOC bordeaux, GEOPS Paris sud, GET, Ifremer, IPGS/EOST CNRS/Université de Strasbourg, LMV université de Clermont – Auvergne

Afin de comprendre l'événement tellurique sans précédent de la crise Sismo-Volcanique de Mayotte (SVM; 2018-2020), il apparaît indispensable d'atteindre un niveau critique de connaissances sur l'évolution de la déformation sismique, volcanique et géodésique, mais aussi sur le contexte géodynamique, y compris la cinématique et la caractérisation des structures lithosphériques et crustales, à court et à long terme et à l'échelle régionale et locale. Le projet COYOTES vise à mieux comprendre le contexte géodynamique et géologique régional du nord du canal du Mozambique. Les objectifs sont de comprendre la répartition des déformations actives et récentes autour de l'archipel des Comores dont Mayotte, de visualiser la structuration crustale et d'étudier l'évolution tectono-sédimentaire récente. Ces résultats fourniront des informations sur le rôle de l'héritage dans la distribution spatiale de la déformation actuelle, liée à la crise SVM. Cette compréhension du contexte géodynamique et géologique sera utilisée pour mieux contraindre l'évaluation des aléas de la région et tout particulièrement autour de Mayotte. Ce projet est organisé en trois thématiques : 1) Séquence, déformation et cinématique sismiques actuelles; 2) Volcanisme et tectonique récents et actifs dans l'archipel des Comores; 3) Géodynamique à long terme: structuration régionale et héritage. Il intégrera de nouvelles données géologiques et géophysiques (onshore/offshore), leur interprétation ainsi que des phases de modélisation.

Le projet COYOTES de 2020 à 2024 (<http://www.geoccean.net/coyotes/doku.php?id=start>) est financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche), dans lequel trois thèses, un post-doc et plus de 30 scientifiques sont impliqués [BRGM, IPGS/EOST, IPGP, IsTep, ENS, Université de La Réunion, EPOC, Ifremer, GEOPS, LMV, GET, ISTO, OVPF]. Ce projet est associé à la campagne océanographique SISMAORE qui se déroulera à bord du navire PourquoiPas? de Décembre 2020 à Février 2021.

Mots-Clés : Mayotte; Crise sismo-volcanique; volcanisme; tectonique; déformation active ; Archipel des Comores; Canal du Mozambique



Discovery of recent volcanic and tectonic provinces along the Comoros archipelago (North Mozambique Channel) – Preliminary results of the SISMAORE oceanographic cruise (ANR-COYOTES project)

Isabelle Thinon^{*1}, Anne Lemoine¹, Sylvie Leroy², SISMAORE³ and COYOTES⁴ teams.

¹ BRGM- French Geological Survey - Orléans

² ISTE²P, Sorbonne Université, CNRS-INSU, Paris

³ BRGM, CNRS-INSU, ENS, EPOQ-université de Bordeaux, GET, Ifremer, IPGP, Université de la Réunion, ITES- EOST-Université de Strasbourg, LOG-Université de Lille, Sorbonne Université, BGR, Geo-Azur, Université des Comores;

⁴ <https://anr.fr/Projet-ANR-19-CE31-0018> ; <http://www.geocean.net/coyotes/doku.php?id=start>

A new geophysical and geological dataset, acquired during the SISMAORE oceanographic campaign (2020-2021), reveals a recent tectonic and volcanic deformation distributed over 130km in the abyssal plain that permit to unravel the unconstrained lithospheric plate boundaries between Lwandle and Somalia blocks and the controversial origin of the Comoros Archipelago.

Two recent submarine volcanic and tectonic provinces of 5000km², with a large number of varied volcanic structures and faults, are unveiled: the N160° N'Droundé (north of Grande- Comore) and the N130° Mwezi provinces (north of Anjouan/Mayotte). Dredged Mwezi rocks suggest a recent gas-rich volcanic activity. It is also identified a recent N130° trending volcanic structures (cones, lava flows, eruptive fissures) between Anjouan and Mayotte in agreement with the presence of shallow earthquakes, and also recent lava flows on the southern flanks of the Grande Comore and Moheli. Southwards, recent sedimentation is important with no volcanism and deformation. A consistent sedimentary thickness covers the flanks of Mayotte and Anjouan and the presence of large areas of submarine instability at the foot and on the slope of the islands is confirmed.

These first observations suggest a transtensional deformation, accommodated by dextral strike-slip motion, strongly influenced by pre-existing structuration of the Mesozoic oceanic crust and by the East Africa Rift system. The 130km wide zone of intraplate deformation characterizes an immature lithospheric plate boundary of the north Lwandle block.

SISMAORE onboard team: S. Ali, C. Berthod, J. Bernard, J. Bignon, P. Boymond, S. Bujan, A. Canva, N. Chamot-rooke, V. Clouard, E. Dassie, M. Delescluse, C. Doubre, V. Famin, N. Feuillet, D. Franke, E. Jacques, S. Jorry, C. Masquelet, N. Mercury, F. Paquet, V. Roche, F. Rolandone, A. Rusquet, C. Scalabrin, S. Abdoulahmid, J. Van der Woerd, L. Watremez, S. Zaragosi; On land: L. Sadeski, L. Michon, P. Bachèlery. C. Deplus, D. Sauter

Keywords: Recent tectonic and volcanic deformation, inheritance, Comoros archipelago, Mozambique Channel, Mayotte, SISMAORE, ANR COYOTES.



Seismogenic potential of the High Durance Fault constrained by 20 years of GNSS measurements in the Western European Alps

Marguerite Mathey ¹, Andrea Walpersdorf ^{*1}, Christian Sue ^{1,2}, Stéphane Baize ³,
Aline Deprez ¹

¹ University Grenoble Alpes, University Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, ISTerre, Grenoble, France

² CNRS-UMR 6249, Bourgogne-France-Comté University, Besançon, France

³ IRSN, PSE-ENV/SCAN/BERSSIN, BP 17, F-92262 Fontenay-aux-Roses, France

Due to the steady moderate seismicity observed along the Briançon seismic arc, in the southwestern French Alps, three temporary GNSS surveys took place in 1996, 2006 and 2011, across a $\sim 50 \times 60$ km² wide area, to investigate the surface deformation field. The horizontal velocity field computed from these three surveys showed an east-west extension in the network. A fourth campaign was led in 2016, creating a 20 year observation span, resulting in measurements which reach a sufficient accuracy to assess whether extension found within the Briançon network is localized onto any particular tectonic feature. Several faults in this area are known to be active normal faults. Assessing the localization of the deformation may lead to a better understanding of the active tectonics of the Alpine belt. To address this issue, a robust velocity field was computed from the combination of the different campaign and permanent GNSS data. Strain rate tensors were derived for the first time in this area on a 0.1 by 0.1 degrees grid to assess the distribution of the deformation. The regional deformation appears localized in the Briançon area and reaches up to 20 ± 5 nanostrain/yr in the center of the network. The observed velocities were projected on a profile across the network and compared with modelled interseismic deformation to characterize the behavior of the major active faults known in the study zone. While a two-fault model provides the best fit to the data, a single fault model has only marginally higher residuals, with parameters that are more consistent with the seismotectonics of the region. The localization of the single modelled fault is consistent with the location of the High Durance Fault. Therefore, we used the known geological location of this structure as a priori information in a block model to compute a fault slip rate at the interface between the two blocks. The velocities on the interface indicate 0.4 to 0.5 mm/yr of extension, and therefore strain accumulates along the High Durance Fault throughout the seismic cycle. The geodetically derived fault slip rate is converted into an equivalent seismic moment release rate, which is consistent within its uncertainty bounds with the known historical and instrumental seismicity of the Briançon area.

Mots-Clés : Geodetic instrumentation, Transient deformation, Dynamics and mechanics of faulting, Seismicity and tectonics, Continental tectonics: extensional, Neotectonics



T5.5 Bassins et ressources pour le XXI siècle



Origin of authigenic chlorite in deep marine siliciclastic turbidites and their implication on reservoir quality

Fares Azzam ^{1*}, Thomas Blaise ¹, Patricia Patrier ², Daniel Beaufort ², Ahmed Abd Elmola²,
Eric Portier ³, Benjamin Brigaud ¹, Jocelyn Barbarand ¹

¹ Paris-Saclay university, CNRS, GEOPS, France

² Poitiers university, IC2MP, CNRS, France

³ CV Associes Engineering, France

Authigenic chlorite grain-coatings are very common in siliciclastic rocks. Their presence can either improve or reduce the reservoir properties of sandstones. To date, only a few studies have focused on their origin and formation mechanisms in turbidite sandstones. Here, we discuss the origin and distribution of chlorite coatings in the turbiditic sandstones of the Agat Formation (Aptian/Albian) in the northern North Sea.

Chlorite coats exert a major control on the reservoir quality in the Agat sandstones. In the lower part of the reservoir, chlorite forms a thick coat (15-25 μm) around detrital grains that strongly reduce permeability. Conversely, in the upper part of the reservoir, chlorite coats are thinner (4-10 μm), favoring porosity preservation by inhibiting the development of quartz overgrowth. X-ray diffraction and electron microscope observations indicate Fe-rich chlorite of Ib ($\beta = 90^\circ$) polytype suggesting a transformation from a berthierine precursor. Chlorite formation was favored by the presence of abundant Al and Fe-rich detrital grains (glauconite, ooids, and mudclast). The dissolution of these grains at low temperature under reducing conditions created a suitable environment for the growth of berthierine. This step was followed by the transformation of berthierine into chlorite at higher temperatures ($>50^\circ\text{C}$) through a solid-state transformation. The development of thick chlorite coatings in the lower part of the reservoir was mainly related to highly abundant Fe-grains, providing a significant amount of iron upon dissolution.

This study shows the important role of chlorite coatings in controlling the reservoir quality in turbidite sandstones. It also highlights the role of inherited sediment composition in controlling the abundance and thickness of the chlorite coats.

Mots-Clés : sandstone, turbidites, chlorite coating, reservoir quality



Circulations de fluides à l'interface entre le socle et la couverture : apport de l'étude paragénétique et des inclusions fluides des minéralisations de Vendée (France)

Loïc Bouat^{1*}, Pierre Strzeczynski¹, Véronique Gardien²,
Yannick Branquet^{3,4}, Guillaume Barré⁵, Régis Mourgues¹

¹ LPG (Laboratoire de Planétologie et Géodynamique), CNRS : UMR6112, Université Le Mans, France

² LGL (Laboratoire de Géologie de Lyon), CNRS : UMR5276, Université Lyon 1, France

³ Géosciences Rennes, CNRS : UMR6118, Université de Rennes 1, France

⁴ ISTO (Institut des Sciences de la Terre d'Orléans), CNRS : UMR7237, Université d'Orléans, France

⁵ Département de géologie et génie géologique, Centre E4M, Université Laval, Canada

Dans les bassins sédimentaires, les variations de porosité et de lithologie des premiers dépôts font de l'interface entre socle et couverture, une zone privilégiée pour la circulation et le mélange de fluides d'origines variées (métamorphique, météorique ou de bassin). Ces mélanges aboutissent à la précipitation de minéraux à l'origine de nombreux gisements (U, Pb-Zn-Ag...) localisés dans des formations perméables à l'interface socle couverture et sous une barrière imperméable.

En France de nombreux gisements à Pb-Zn sont connus à la limite entre les massifs Varisques et les bassins mésozoïques comme par exemple sur la bordure ouest du Massif Central, ou encore dans la Montagne Noire. Dans le domaine Armoricaïn, le long des limites Nord et Est du Bassin Aquitain, les précédents travaux sur ces minéralisations attestent du mélange des trois sources de fluides au Jurassique supérieur (Cathelineau et al., 2012). Ces minéralisations sont strictement localisées sous un niveau imperméable daté du Toarcien sauf sur la côte vendéenne où les minéralisations recoupent également des sédiments d'âge Callovien. Sur des arguments structuraux, Strzeczynski et al., (2020) proposent que les fluides minéralisateurs ont traversé la barrière imperméable le long de fractures formées par surpression de fluide.

L'objectif de cette étude est de préciser les relations chronologiques entre minéralisations, arrivée des fluides de différentes sources à la base du bassin et rupture de la couverture. Pour cela, nous présentons, une étude paragénétique et microthermométrie d'échantillons issus de la côte vendéenne.

La succession paragénétique est caractérisée par une fluorine précoce ($\pm$ galène), suivie par la barytine et enfin des sulfures (pyrite, marcasite). Le quartz, omniprésent, s'intercale entre les différentes phases.

Les résultats de microthermométrie confirment le mélange de trois fluides : le plus ancien, enregistré par les inclusions fluides de la fluorine, est une saumure de bassin, froide et fortement salée. Le second provient d'inclusions fluides de barytine et de quartz, c'est un fluide aqueux moins salé et plus chaud que ce qui avait été observé auparavant. Le mélange de ces fluides coïncide avec la rupture de la couverture par fracturation assistée par fracturation hydraulique. Cela induit la percolation d'un troisième fluide superficiel diminuant ainsi la température et la salinité ce qui entraîne une baisse de solubilité des métaux dissous et leur précipitation.

Mots-Clés : minéralisation Pb-Zn-Ba, Vendée, interaction fluide-roche, discordance, inclusions fluides, saumures



Origine des eaux salées, des émanations gazeuses azotées (+Hélium) et des minéralisations de fluorine à l'extrémité nord de la Grande Faille du Bazois : Apport du couplage entre pétrologie, hydrogéologie, géochimie et géophysique

Benjamin Brigaud^{1*}, Jocelyn Barbarand¹, Anne Battani², Antonio Benedicto¹,
Thomas Blaise¹, Damien Calmels¹, Véronique Durand¹, Emmanuel Léger¹,
Louise Lenoir¹, Carlos Pallares¹, Albane Saintenoy¹, Philippe Sarda¹, Hermann
Zeyen¹,

¹Université Paris-Saclay, CNRS, GEOPS, 91405 Orsay, France

²Université de Pau et Pays de l'Adour, CNRS, Total, Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs, 64000, Pau, France

Au sud-ouest du Bassin de Paris, la Grande Faille du Bazois met en contact les séries mésozoïques du Bassin de Paris à l'ouest avec le socle paléozoïque métamorphique et magmatique du Morvan à l'est. Le long de cette faille, à Pierre-Perthuis (à proximité de Vézelay), affleure la discordance socle-couverture marquée par l'existence du gisement de fluorine de classe mondiale. A moins de 1.5 km de ce gisement, des puits édifiés il y a environ 4300 ans captent des eaux relativement riches en chlore, sodium et lithium et des émanations gazeuses azotées (+He). Malgré les connaissances historiques sur ce site archéo-géologique, beaucoup de questions subsistent quant aux processus responsables des circulations de fluides, des minéralisations ou des émanations gazeuses :

- Quand ces minéralisations se sont-elles mises en place et quelle est la nature de l'eau à l'origine de cette minéralisation ? Quel rôle aurait joué la Grande Faille du Bazois ?
- Quelle est l'origine/source du Na, Cl, et Li dans les paléo-fluides et fluides actuels ? Quelle est l'origine des émanations gazeuses : $N_2 + He + H_2$? Quel est l'impact du fonctionnement de la nappe alluviale en surface sur notre compréhension des fluides échantillonnés dans les puits ?
- Sur quels concepts reposent les mécanismes de production, diffusion ou accumulation d'He ?
- Quel est le rôle de l'encaissant granitique (alcalins, hyperalcalins, hyperalumineux) ?
- Quel schéma méthodologique multi-disciplinaire peut être développé afin de mieux caractériser et comprendre les chemins de migration ?

Pour répondre à toutes ces questions, nous avons entrepris une étude couplant plusieurs disciplines des Géosciences : minéralogie, pétro-géochimie du granite/gneiss, géochimie : éléments majeurs et traces, $\delta^{18}O$ - δD , $\delta^{37}Cl$, He dans les fluides, éléments traces, chronologie par traces de fission sur apatite, Sm-Nd et U-Pb sur fluorine, mesures hydrogéologiques et prospection géophysique (tomographie sismique, tomographie de résistivité électrique). Les datations indiquent que la majeure partie des minéralisations se met en place avant le Crétacé supérieur. Une remobilisation de fluide est reconnue et datée à 40 Ma (Lutétien/Bartonien) et correspond à la mise en place de la Grande Faille du Bazois. Les données géophysiques permettent de dresser des hypothèses sur les chemins empruntés par les fluides remontant actuellement le long de l'accident. Les données géochimiques suggèrent que les eaux actuelles et les paléofluides crétacés seraient d'origine météorique avec un apport en Cl provenant d'une eau de mer emprisonnée dans les argiles du Lias. La faille permettrait à ces fluides captifs à plus de 100 m de profondeur de remonter en surface et de se mélanger avec les eaux du socle (potentiellement riche en K, Li, Na...) et de la nappe alluviale (potentiellement riche en Ca et HCO_3). La présence de CO_2 , avec un $\delta^{13}C$ à -20‰ ou encore la présence potentielle de Ra dans les émanations de gaz évoqueraient plutôt une origine de proche surface en relation avec le granite riche en alcalins, avec minéraux accessoires porteurs de Th et U (uraninite, monazite, thorite, zircon, apatite, sphène, etc.). L'He serait stocké dans le réservoir que constitue l'interface socle/couverture, et serait libéré le long de la faille.

Mots-Clés : Géophysique, Géochronologie, Hydrogéologie, Pétrographie, Paléofluides, Fluides, Gaz



NMR contribution in sub-horizontal well for porosity-permeability heterogeneity characterization in limestones: implications for 3D reservoir prediction and flow simulation in a world class geothermal aquifer

Maxime Catinat ^{*1,2}, Benjamin Brigaud ¹, Marc Fleury ³, Miklos Antics ², Pierre Ungemach ², Mélanie Davaux ², Julien Gasser Dorado ², Hadrien Thomas ¹, Codjo Thomas Florent Essou ², Simon Andrieu ⁴, Emmanuel Mouche ⁵

¹ Université Paris-Saclay, GEOPS, CNRS, 91405 Orsay, France

² GEOFLUID, 165 Rue de la belle étoile, 95700 Roissy CDG, France

³ IFP Energies Nouvelles, 1-4 Avenue de Bois-Préau, 92852 Reuil-Malmaison, France

⁴ BRGM, 3 Avenue Claude Guillemin, 45100 Orléans, France

⁵ Université Paris-Saclay, CNRS, CEA, UVSQ, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, 91191, Gif-sur-Yvette, France

Background

The Paris suburban areas concentrate ca fifty, deep seated, geothermal district heating (GDH) systems which contribute to the French energy climate strategy ambitioning a 6,4 TWh_{th} production in year 2023 achieving a four fold increase as compared to the 1,5 TWh_{th} recorded in year 2016. In spite of a highly dependable geothermal resource, the current 70 MWh_{th} yearly development rate will not meet this objective which would require a six to ten fold higher rate instead. Hence, optimizing and mastering the French geothermal energy problematic stand as a major challenge for France at large, and the Ile-de-France region specifically which hosts a population nearing 12 million inhabitants.

Project descriptions

It aims at reconstructing and simulating the heat and mass transfer in the Paris Basin by implementing an innovative methodology addressing (i) reservoir lithological and petrophysical properties as to facies, porosity and permeability trends, and (ii) modelling, simulating and predicting regional hydrothermal flow patterns and reservoir performance at given locations. As a result the study workflow focuses on an area, South of Paris (Cachan and surroundings), concentrating a population of seventeen (nine producers, eight injectors) GDH wells.

At Cachan a subhorizontal GDH doublet, a world premiere in geothermal well architecture, has been drilled in 2018, seeking enhanced well productivities in medium to low permeability reservoir areas which otherwise would have remained unchallenged. Here, Nuclear Magnetic Resonance (NMR, T₂) logs have been recorded on the injector well (GCAH2), providing reliable information on pore size distributions, (connected vs non connected) porosities and permeabilities.

A variety of wireline logging data ranging from Gamma Ray to density, resistivity, sonic, neutron and NMR T₂ tools have been compiled on the nineteen wells of the area along 120 thin sections processed for facies description and nomenclature. A total of seven facies, grouped within four facies associations, coded over the whole nineteen wells according to depths and thirteen 3^d order stratigraphic sequences, have been identified. The cell size of the 3D modelling grid was set to 50 m x 50 m in the XY domain, the vertical Z size, which depends on the subzonal thicknesses, averaging 5 m, thus leading to a 3D grid nearing 800 000 cells. Further to upscaling, facies and stratigraphic surfaces set the basis for a reliable modelling exercise applying the « Truncated Gaussian With Trends » algorithm. The petrophysical distribution « Gaussian Random Function Simulation » is used to populate the entire grid with input properties including some 2 000 NMR data and former porosity- permeability data derived from oil well core plug tests.

The most attractive reservoir properties are located within the shoal oolitic grainstone deposits exhibiting porosity and permeability values overaging 12.5% and 100 md respectively. Ultimately, mass and heat transfers were simulated via the Pumaflow software in order to assess the risks induced by interfering doublets and provide guidelines respective to optimum well trajectories securing system hydraulic connectivities and thermal life.

In this respect NMR, especially permeability issued data, provided useful clues addressing the advent of thermal breakthroughs within areas showing a high density of GDH doublets.



Origine et évolution chimique des saumures enrichies en métaux dans les bassins sédimentaires

Elza Dugamin ^{*1}, Michel Cathelineau ¹, Antonin Richard ¹, Marie-Christine Boiron¹, Frank Despinois ²

¹ Université de Lorraine – CNRS – GeoRessources – CREGU – France

² TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – France

Dans le cadre de projets de stockage du CO₂ dans des aquifères salins, il est attendu de produire des eaux fortement salines, naturellement impropres à la consommation. La composition de ces eaux dépend de nombreux paramètres, notamment de leur origine (météorique, marine...) et des interactions fluides-roches. Elles peuvent ainsi contenir des concentrations non négligeables en espèces métalliques à fort potentiel économique (ex : Li, Ni, V, Co, Terres Rares, etc...).

Dans le but d'évaluer le potentiel des aquifères salins en tant que ressource alternative de métaux et de mieux comprendre leurs mécanismes d'enrichissement associés, nous avons compilé les analyses de 4000 échantillons de fluides de bassins sédimentaires, tirées de la littérature (1971-2021). Cette étude s'est tout d'abord concentrée sur l'élément lithium. On montre ainsi que certains fluides de bassins peuvent contenir des concentrations en lithium comparables à celles retrouvées dans les saumures des salars i.e. >500 mg/l. Les concentrations en lithium plus élevées que l'eau de mer (> 0,17 mg/l) et jusqu'à un maximum d'environ 1000 mg/l sont systématiquement retrouvées dans des eaux chlorurées de relativement haute température (> 100°C), forte salinité (10000 < TDS < 300000 mg/l) et riches en calcium (Ca) (1000 < [Ca] < 100000 mg/l). Les principaux facteurs contrôlant les enrichissements en lithium semblent être liés à l'évaporation de l'eau de mer (indiquée par les relations Li-Br-Cl) et aux interactions fluides-roches (indiquées par les fortes concentrations en calcium).

Mots-Clés : Lithium, saumures, bassins, base de données, stockage de CO₂



Characterization of Crustal Fault Zones as geothermal power systems: a multidisciplinary approach

Hugo Duwiquet ^{*1,2,3,4}, Laurent Guillou-Frottier ^{2,3}, Laurent Arbaret ³, Théophile Guillon ²
Mathieu Bellanger ⁴, Michael J. Heap ⁵

¹ Université d'Orléans, ISTO, UMR 7327, 45071, Orléans, France.

² BRGM, F-45060 Orléans, France.

³ ISTO, UMR7327 Université d'Orléans, CNRS, BRGM, F-45071 Orléans, France.

⁴ TLS-Geothermics, 91 chemin de Gabardie, 31200, Toulouse, France.

⁵ Géophysique Expérimentale, Institut de Physique de Globe de Strasbourg, UMR 7516 CNRS, Université de Strasbourg/EOST, 5 rue René Descartes, 67084 Strasbourg cedex, France.

As potential geothermal reservoirs, crustal fault zones remain largely unexplored and unexploited. The aim of this work is to understand the potential of these naturally permeable area, with the example of the Pontgibaud crustal Fault Zone (PFZ), a crustal scale fault in the French Massif Central. The PFZ has been well studied in the last few years (Bellanger et al., 2017). Electrical conductivity anomalies have been identified (Ars et al., 2019) and a positive temperature anomaly has been estimated (150°C at a depth of 2.5 km, Duwiquet et al., 2019). These results highlighted that vertical crustal fault zones could concentrate the highest temperature anomalies at shallow depths. However, these results did not characterize the capacity of the system to allow fluids to circulate at different scales, and the numerical models did not consider 3D effects and interactions between fluids, deformation and temperature. New 2D (thin-section) and 3D (X-ray micro-tomography) observations point to well-defined spatial propagation of fractures and voids at different scales (2.5 μm to 2 mm). This architecture at different scales appears to be arranged in a way to facilitate fluid flow (Bejan and Lorente, 2011). We performed 3D numerical modeling where permeability, stress intensity, and stress direction relative to the deformation zone were varied systematically. In accordance with 2D results, the 3D results show three different convective patterns (finger-like, blob-like and double-like). These results also show that the deformation zones are at an angle of 30° and 70° to the stress direction will have the most intense temperature anomalies at the shallowest depths. Finally, large scale (at the scale of the PFZ) 3D numerical modeling of Thermal (T) Hydraulic (H) and Mechanical (M) behaviours has been performed. The comparison with field data is used to characterize the spatial geometry of the 150°C isotherm.

Key words : Crustal Fault Zones, High temperature geothermal system, Constructal theory, 3D THM Numerical modelling, Pontgibaud, French Massif Central

*Intervenant





Evolution de l'abondance et des mouvements des éléments de terres rares dans un profil latéritique, Biniomi, Gabon

Foulques Guillet De Chatellus ^{*† 1}

¹ UniLaSalle – Jessica BONHOURE – France

Where $\alpha(\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O})$ is the oxygen fractionation factor, T is in °C. Measured $\Delta 47$ imply growing temperatures that are in excellent agreement with those estimated from oceanographic data. This supports the use of clumped isotopes as an alternative temperature proxy which can be used with $\delta 18\text{O}$ to estimate past $\delta 18\text{O}_{\text{sw}}$ with a precision of about 1‰ VSMOW. The application of Mg/Ca paleothermometry to brachiopod shells will also be discussed. Our results will be compared to published relationships between brachiopod shell geochemistry and growing temperature. Such multi-proxy studies of modern brachiopod shell geochemistry are critical for studying the fossil record and resolve challenging questions regarding the Phanerozoic climate record.

Mots-Clés: Ressources minières, gisement manganésifère, profil latéritique, manganèse, Gabon, Biniomi, géochimie, minéraux manganésifères, diagrammes ternaires, diagramme de corrélation, REE

*Intervenant

†Auteur correspondant: foulques.guilletdechatellus@etu.unilasalle.fr





Exploration d'hélium en France : avancées du projet Fonts-Bouillants dans la Nièvre et résultats apportés par de multiples acquisitions géophysiques et géochimiques.

Benoît Hauville ^{*1}, Charlotte Laine ¹, Nicolas Pélissier ¹, Molly Boka Mene¹, Thomas Jacob ², Nicolas Coppo ²

¹ 45-8 ENERGY - France

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

45-8 ENERGY est une société française dédiée à l'exploration d'hélium et d'hydrogène natif ainsi que les ressources connexes qui peuvent leur être associées. Après avoir réalisé des travaux préliminaires dans la Nièvre, 45-8 ENERGY a déposé en 2019 la demande de Permis

« Fonts-Bouillants » afin de déterminer le potentiel d'une exploitation conjointe d'hélium et de gaz carbonique aux abords de la faille de Saint-Parize (FSP) où ces deux ressources, rencontrées en quantités anormalement élevées, sont naturellement rejetées naturellement dans l'atmosphère.

La zone d'étude, située à la bordure Sud du Bassin de Paris, n'a jamais fait l'objet d'investigations dans le passé faute jusqu'à lors d'intérêt industriel ou scientifique. La quasi absence d'affleurement rend en outre la caractérisation structurale incertaine voire hypothétique, justifiant ainsi le recours aux méthodes géophysiques pour dresser un modèle géologique prédictif du sous-sol à faible et moyenne profondeur.

Un projet de recherche a ainsi été mené avec le BRGM dans lequel ont été acquis de la gravimétrie régionale haute résolution, des profils de résistivité électrique (ERT), un profil sismique réflexion, une acquisition électromagnétique à source contrôlée (CSEM) et audiomagnétotellurique (AMT). Les données historiques d'aéromagnétisme ont en outre été retraitées.

L'intégration des données a permis de préciser la géométrie de la FSP et des terrains adjacents et a mis en évidence des dépocentres permo-carbonifères en bordure de celle-ci. Le modèle géologique a ainsi considérablement évolué ; en combinaison avec les mesures géochimiques réalisées, il est désormais possible de proposer des mécanismes de genèse et migration des différents gaz. D'autres acquisitions sont déjà planifiées, telles une sismique 3D centrée sur la FSP ou d'autres profils ERT afin d'implanter des sondages faible profondeur dont l'objectif sera de recouper le plan de faille de la FSP et donc le flux gazeux émanant au droit de celui-ci.

Mots-Clés : hélium, gaz carbonique, faille, géophysique, Nièvre, Permien, Carbonifère, Bassin de Paris



Exploration géophysique au sein du PER “Fonts-Bouillants”: apport des méthodes gravimétriques, audiomagnétotelluriques et électromagnétiques à source contrôlée

Thomas Jacob^{*1}, Nicolas Coppo¹, Frederic Dubois¹, Pierre Wawrzyniak¹, Angélie Portal¹, Adnand Bitri¹, Ianis Gaudot¹, Laurent Beccaletto, Pauline Le Maire¹,
Charlotte Laine², Benoît Hauville², Nicolas Pellissier²

¹ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

² 45-8 Energy - France

Une convention de recherche et développement a été signée entre le BRGM et 45-8 Energy pour investiguer la structure du sous-sol au sein du permis exclusif de recherche (PER) « Fonts-Bouillant » (Nièvre, 15 km au Sud de Nevers), avec pour finalité la captation et l'exploitation de l'hélium et du gaz carbonique.

Une première phase de travaux géophysiques, incluant une acquisition gravimétrique régionale, une acquisition audio-magnétotellurique et d'électromagnétisme à source contrôlée (AMT/CSEM), ainsi qu'un retraitement des levés aéromagnétiques présents sur la zone, a été menée sur un secteur du PER, avec pour objectifs :

- De préciser le tracé de la faille de Saint-Parize-le-Châtel, qui est un vecteur de la remontée des gaz
- D'apporter des contraintes sur la profondeur du toit du socle, de part et d'autre de cette faille
- D'améliorer la compréhension géologique et structurale du secteur d'étude

Les données géophysiques acquises ont permis de préciser le tracé de la faille de Saint-Parize-le-Châtel et de découvrir d'autres structures, jusqu'alors inconnues, dont la présence d'un graben et d'un horst. Une géométrie de l'interface socle-sédiment est proposée par inversion 3D des données gravimétriques. Les inversions AMT en sections 2-D, et CSEM, en 3D, permettent de définir la structure en résistivité du sous-sol sur les 1000 premiers mètres, globalement très conductrice.

Sur la base de ces résultats, une deuxième phase d'acquisition de sismique réflexion et de tomographie de résistivité électrique a permis de préciser la géométrie de la faille de Saint- Parize-Le-Châtel.

Toutes ces nouvelles informations ont été intégrées au modèle géologique afin d'améliorer la compréhension du système géologique et structural à l'origine des émanations en Hélium.

Mots-Clés : Gravimétrie, audiomagnétotellurique, électromagnétisme à source contrôlée, sismique réflexion, tomographie de résistivité électrique, magnétisme aéroporté, hélium.



Couplage entre évolution structurale et dynamique des circulations fluides dans les systèmes métallogéniques et géothermaux

Patrick Ledru*, Julien Mercadier, Yves Géraud

GéoRessources, Université de Lorraine, France

L'exploration des géoressources est basée sur l'évaluation de différents critères de favorabilité aussi désignés sous le terme d'empreintes. Alors que les empreintes minéralogiques, physiques et chimiques associées à ces ressources peuvent être identifiées à l'échelle régionale ou le long de linéaments, au sein de lithologies ou de structures particulières, les gisements de métaux ou les réservoirs géothermaux ont des distributions beaucoup plus restreintes que ces empreintes. Leur exploration nécessite donc la mise en œuvre de campagnes de forage et de paramétrisation du domaine souterrain longues, coûteuses et au taux de succès faible. Les gisements métalliques localisés à l'interface entre bassin sédimentaire et socle en sont un parfait exemple, avec en particulier les gisements de discordance d'uranium du bassin d'Athabasca (Saskatchewan, Canada), concentrés sur des volumes très restreints. Leur formation est dépendante de mélanges de quantité considérable de fluides géologiques à cette interface bassin-socle, permis par la présence de structures jouant le rôle de drains et de lieux d'interaction fluide-fluide et fluide-roche. Néanmoins, les vecteurs orientant l'exploration vers la découverte de gisements économiques restent empiriques et mal contraints.

Les connaissances récentes sur les systèmes géothermiques améliorés suggèrent que les processus actifs dans ces environnements sont extrêmement proches de ceux passés à l'origine des gisements métalliques à l'interface bassin-socle, ouvrant des perspectives majeures de co-compréhension de ces deux systèmes jusqu'à présent considérés séparément. Ainsi, la stimulation des réseaux de perméabilité hérités et le rôle des structures dans un contexte tectonique donné apparaissent comme des conditions indispensables dans les deux systèmes pour initier, développer et faire fonctionner de façon durable de hauts flux de fluides au sein d'échangeurs thermiques et chimiques qui aboutiront à la formation de gisements ou de réservoirs géothermaux. Les analogies entre la sismicité induite des expériences de développement des réservoirs géothermiques améliorés et l'injection polyphasée des fluides hydrothermaux dans les zones de cisaillement ouvre ainsi de nouvelles perspectives de ciblage prédictif des zones fossiles réactivées et minéralisées dans les gisements par comparaison du couplage entre les régimes de déformation et la circulation des fluides dans les systèmes stimulés de façon naturelle (gisements) et anthropique (géothermie améliorée). L'optimisation de l'exploration des minéralisations de discordance, qui constituent une classe de gisements couvrant un très large champ de ressources métalliques, et des ressources géothermales sont ainsi des enjeux importants de la transition énergétique.

Mots-Clés : Gisement de discordance, système géothermique amélioré, réseaux de perméabilité



Paléofluides minéralisateurs et eaux interstitielles actuelles à l'interface socle-couverture dans le Bassin de Paris

Louise Lenoir^{1*}, Thomas Blaise¹, Diana Chourio-Camacho², Alexandre Tarantola³, Pierre Agrinier⁴, Antonin Richard³, Thomas Rigaudier⁵, Gaël Monvoisin¹, Gérard Bardoux⁴, Benjamin Brigaud¹, Jocelyn Barbarand¹

¹ Université Paris-Saclay, CNRS, GEOPS, 91405, Orsay, France

² Université PSL, MINES ParisTech, Centre de Géosciences, France

³ Université de Lorraine, CNRS, CREGU, GeoRessources Laboratory,

France⁴ Université de Paris, Institut de Physique du Globe de Paris,

CNRS, France ⁵ Université de Lorraine, CRPG, CNRS, France

Dans cette étude, nous reconstruisons l'origine des paléofluides du Bassin de Paris à partir des inclusions fluides primaires piégées dans des cristaux de fluorite géodique datés à 130 ± 15 Ma [1]. Les échantillons proviennent de deux gisements de minerai F-Ba (Pierre-Perthuis et La Colancelle) situés au toit de la discordance socle/sédiment de la bordure sud-est du Bassin de Paris. La microthermométrie révèle des températures de piégeage minimales d'environ 110°C , tandis que la salinité est en moyenne de 18 % en poids équivalent NaCl, les sels de chlorure de calcium sont dominants. La composition en isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène des inclusions fluides mesurée par micro-équilibre indique la contribution dominante d'eaux météoriques. Les principaux ions dissous dans les inclusions fluides ont été mesurés en utilisant une méthode d'écrasement-lessivage [2]. Les rapports Cl/Br montrent que les salinités ont été acquises par l'évaporation de l'eau de mer au-delà de la précipitation de la halite. Cependant, les valeurs de $\delta^{37}\text{Cl}$ sont nettement inférieures à la composition attendue d'une eau de mer évaporée. Nous proposons que la fluorite a précipité à partir du mélange de deux fluides : 1) une eau de mer évaporée expulsée et fractionnée pendant la compaction des sédiments puis 2) diluée par des eaux météoriques infiltrées le long des fractures.

Les eaux actuelles des aquifères triasiques de la partie centrale du Bassin de Paris [3,4] présentent des compositions chimiques et isotopiques comparables à celles mesurées dans ces inclusions fluides piégées dans des cristaux de fluorite. Des saumures actuelles, avec une concentration élevée en Ca et F, ont également été documentées dans le socle fracturé du centre du Bassin de Paris [5]. La migration ascendante de ces fluides à travers les fractures du socle cristallin et la chute de pression/température associée conduisent à la précipitation de fluorite, comme en témoigne les affleurements actuels de la bordure sud-est du bassin.

Mots-Clés : minerai lié à la discordance, fluorite, isotopes du chlore, crush-leach, inclusions fluides, Bassin de Paris.

[1] Gigoux et al. (2015) *Miner Deposita*, vol. 50, No. 4, 455-463. [2] Gleeson et al. (2003) Book chapter, 32, 233-247. [3] Worden and Matray (1995) *Basin Research*, vol. 7, No. 1, 53-66. [4] Millot et al. (2011) *Chem Geo*, vol. 283, No. 3-4, 266-241. [5] Boulègue et al. (1990) *BSGF*, vol. VI, No. 5, 789-795.



Multi-scale folds/faults/fractures network characterization in the Saar-Lorraine coal basin.

Metzger Mombo Mouketo ^{*1}, Yves Géraud ¹, Marc Diraison ¹, Claire Bossennec ¹, Fady Nassif ²

¹ GeoRessources, Université de Lorraine - France

² La Française de l'Energie (LFDE) - France

In an energy transition context where hydraulic fracture is prohibited, the success of unconventional resources exploration has to rely on the understanding of natural faults/fractures system. The Saar-Lorraine coal basin is a 300 km x 70 km size basin, trending NE, which developed south of the Metz-Hunsruck Boundary Fault zone (a ancient collision limit) during the late stage of the veriscan belt. It has been exploited for its coal seams and nowadays it is a target for a green coal bed methane exploration through a large european project named Regalor hereafter. The rich gas coal seam bearing levels are involved in anticlines and are part of the Westphalian sediments interval. To capture fracture network of these structural objects, a multi-scale analysis of folds geometry and their faults/fractures system was conducted from low resolution scale (seismic) to high resolution (well imagery, cores) and the use of outcrop (analogue) and surface data (geological map, digital terrain model) with an emphasis on the Saarbrücken-Merlebach anticline. First results have highlighted six main points : (1) folds display geometric characteristics of fault-propagation fold; (2) the persistence of NE-SW and NW-SE discontinuities at 1-100 km size range, (3) the presence of two generation of NW-SE faults; (4) a dextral offsetting, abutting and crosscutting relationships between folds and NW-SE faults which can lead to reservoirs compartmentalization; (5) the appearance of NS and EW fractures sets at borehole size which may correspond to the cleat system described on unoriented cores, (6) the complex faults/fractures geometry of the Saarbrücken-Merlebach anticline which serves as analogue for the other anticlines in the basin. Furthermore, field observations on outcrops analogues (Cevennes basin and Graissessac basin) have shown that there is a strong lithological control on fracture orientation and density in such coal bearing systems and that the synsedimentary/tectonic deformation can be very complex due to coal creeping. Structural restoration of folds will help understand the fold growth mechanism in the Saar-Lorraine coal basin.

Mots-Clés: Saar-Lorraine coal basin, inverted structure, fault propagated-fold, structural inheritance, dip-slip reactivation, fault-related fold, background fracture, coal creeping.



Le piège biogéochimique du gisement d'uranium de Zoovch Ovoo (Mongolie) : Importance de la matière organique.

Dimitrios Rallakis¹, Raymond Michels^{1*}, Marc Brouand²,
Olivier Parize² et Michel Cathelineau¹

¹ Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources, UMR 7359, CREGU - France

²ORANO Mining, France

Dans les dépôts sableux non consolidés fluvio-lacustres crétacés du gisement d'uranium de type roll-front de Zoovch Ovoo (Mongolie), la matière organique se trouve exclusivement sous forme de kérogène de type III (plantes supérieures). Il s'agit de particules détritiques de moins de 5mm qui, selon leurs situations sédimentologiques, sont disséminées dans les bancs sableux ou argileux, concentrés dans des lamines sableuses ou présentes dans des intraclastes argileux concentrés en base de bancs sableux. Les structures biologiques de ces particules sont plus ou moins préservées en relation avec leurs distances de transport. Leur maturité thermique est très faible ($\%R_r < 0.4\%$) témoignant d'un gisement qui n'a jamais atteint une température supérieure à 40°C. Ces particules de matière organique sont associées aux plus fortes concentrations en uranium qui peuvent atteindre 78% en masse. De telles concentrations n'ont jamais été observées dans d'autres dépôts similaires d'Asie Centrale.

Certaines particules contenant jusqu'à 20% en masse d'uranium ne présentent cependant aucune expression minérale. Par ailleurs, bien que l'environnement de dépôt n'ait jamais présenté de situation d'anoxie, la présence de pyrite est reconnue dans les faciès sableux et est exclusivement présente dans les lits riches en matière organique.

L'ensemble des caractéristiques géologiques, diagénétiques et géochimiques reconnues indiquent que le piégeage de l'uranium apporté par les eaux du roll-front est piloté par les micro-organismes qui sont responsables du piégeage de l'uranium sur les particules organiques sans expression minérale et de la formation de la pyrite. Cette dernière piège à son tour l'uranium par voie d'oxydo-réduction.

Il s'avère donc que les micro-organismes pilotent les états rédox de l'uranium et du soufre en utilisant les particules de kérogène comme source de nutriments. Il en découle que la matière organique et sa distribution dans les sédiments perméables jouent un rôle primordial dans la formation du gisement d'uranium de Zoovch-Ovoo.

Mots-Clés : Bassin sédimentaire, roll-front, uranium, sulfures, matières organiques, micro-organismes.



Evolution du gisement polymétallique de Chinchillas : apport de la datation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur minéraux argileux.

Julia Ricci ^{*1}, Daniel Beaufort², Philippe Munch¹, Patricia Patrier ², Patrick Monié ¹,
CaffePablo³

¹ Géosciences Montpellier – UMR CNRS 5243, Université de Montpellier – Université des Antilles– France

² Institut IC2MP - UMR7285 CNRS, Université de Poitiers – France

³ Instituto de Ecorregiones Andinas, Université nationale de Jujuy – San Salvador de Jujuy – Argentine

La mine de Chinchillas, située au nord de l'Argentine au cœur de la province de Jujuy est un gisement de minerai polymétallique de classe mondiale, souvent associé à la ceinture étain-argent bolivienne (BTBS). Exploitée depuis décembre 2018, ses réserves sont estimées à 58 Moz d'argent, 310 Mlb de plomb et 127 Mlb de zinc (Puna Operations Inc, 2017).

La minéralisation polymétallique associée au gisement épithermal de Chinchillas se concentre essentiellement au sein d'un diatrème volcanique datant du Miocène moyen et résultant d'un événement dacitique explosif dans les roches métasédimentaires ordoviciennes de la formation d'Acoyte (e.g. Coira et al., 1993). Plusieurs études (e.g. Coira et al. 1993 ; Caffe and Coira, 1999) ont porté sur l'aspect pétrologique et minéralogique des minéralisations métalliques montrant leur association avec une phase d'argilisation hydrothermale des roches du diatrème. Cependant la chronologie du système hydrothermal n'est pas connue aujourd'hui et seul l'épisode volcanique explosif a livré un âge K-Ar de 13.1 ± 1 Ma (Linares & Gonzalez, 1990).

Dans cette étude, nous avons réalisé une série de datations $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur des minéraux argileux (illite, interstratifiés illite-smectite) formés au cours de la phase d'altération hydrothermale, prélevés à différentes profondeurs et à différentes distances des corps minéralisés. L'étude minéralogique de ces échantillons a mis en évidence la présence dans certains échantillons de muscovites, notamment dans les échantillons les plus profonds, probablement héritées du substratum métamorphique. Les illites hydrothermales ont livré des âges entre 11.1 et 12.1 Ma permettant de contraindre pour la première fois la mise en place sensu stricto de la minéralisation polymétallique à ca. 11.5 Ma. L'homogénéité des âges obtenus met en évidence un fonctionnement ponctuel de l'hydrothermalisme.

Les échantillons de plus grande profondeur ont livré des âges plus anciens, compris entre 200 et 250 Ma, correspondant probablement à des muscovites du socle rééquilibrées. Dans ces échantillons, les spectres d'âges mettent en évidence une interaction avec les fluides hydrothermaux associés à la cristallisation d'illites au Miocène.

A plus grande échelle, cette étude permet de mieux comprendre la mise en place des systèmes épithermaux présents dans la ceinture BTBS dans la perspective de prospections futures.

Mots-Clés : Gisement épithermal ; Géochronologie ; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$; Minéraux argileux ; Ressources ; Argentine



Remplissage sédimentaire du bassin carbonifère sarro-lorrain : nouveaux forages, nouvelles données.

Salim Allouti ^{*1}, Metzger Mombo Mouketo¹, Gireau Boumbouet¹, Fabrice Malartre¹, Raymond Michels¹, Danièle Bartier¹, Yves Géraud¹, Marc Diraison¹, Fady Nassif²

¹ Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources, UMR 7359 - France

² La Française de l'Energie – France

Ce travail s'inscrit dans le projet "Ressources en Gaz de Lorraine" (REGALOR), un programme de recherche pluridisciplinaire Lorraine Université d'Excellence, Région Grand-Est, Feder.

La dernière exploitation de charbon en Lorraine a fermé en 2004 pour des raisons associées à la perte de compétitivité des mines françaises. Les quantités de charbon encore enfouies dans le sous-sol lorrain constituent une ressource qui pourra être valorisée en exploitant le gaz de charbon. De nouvelles campagnes d'exploration ont été menées et de nouvelles données sont ainsi disponibles.

Le bassin carbonifère sarro-lorrain s'étend sur environ 300km de long et 20km de large. Le remplissage est constitué de dépôts fluvio-lacustres du Westphalien où se développent les séries à charbon. Suivent ensuite, en discordance, les séries fluvio-lacustres du Stéphaniens dans lesquelles le charbon est quasi-absent. Les dépôts permien et triasiques reposent en discordance sur les séries carbonifères.

A partir des nouvelles données, on cherche à améliorer la compréhension du modèle sédimentaire et de l'histoire thermique du bassin par (i) une étude de l'architecture sédimentaire en lien avec la variabilité des environnements de dépôts et (ii) par des analyses géochimiques de la matière organique et de la minéralogie des argiles.

L'analyse sédimentologique couplée à l'étude des diagénèses permet de distinguer des associations de faciès reflétant le dépôt dans des systèmes alluviaux. Ainsi, on peut mettre en évidence des périodes caractérisées par la dominance des faciès conglomératiques en réponse à la création rapide d'accommodation par des failles extensives. Succède ensuite un arrangement stratigraphique de toutes les fractions granulométriques dans lesquelles s'expriment des couches de charbon et des argiles riches en charbon pendant les périodes de quiescence tectonique. Le cadre tectono-sédimentaire servira de support à une estimation de la répartition des roches-mères et à la reconstruction de l'histoire diagénétique. Suivra une estimation expérimentale du potentiel pétrolier des roches mères. L'ensemble des données conduira, à terme, à estimer la ressource en gaz du bassin.

Mots-Clés : Carbonifère, bassin sarro-lorrain, charbon, histoire diagénétique, potentiel pétrolier, environnement de dépôt



T5.6 Changement climatique récent : observations et impacts



Construire et reconstruire en zone de submersion marine : quelles stratégies pour les îles de Saint-Martin et Saint- Barthélemy ?

Gwenaël Jouannic ^{*1,2}, Kelly Pasquon ^{1,3}, Julien Gargani ^{3,4},

¹ Cerema Ouest, Département des transitions territoriales

² Cerema, Equipe ESPRIM

³ Geops, Université Paris-Saclay - France

⁴ Centre d'Alembert, Université Paris-Saclay - France

Les institutions internationales, par la ratification des cadres d'action de Hyogo et de Sendai, invitent les gouvernements des États à élaborer des politiques et des mécanismes visant à garantir que la réduction des risques de catastrophe est intégrée aux efforts de redressement et de reconstruction. Cependant, les pays qui ont introduit des politiques de réduction des risques dans la planification du relèvement rencontrent souvent des difficultés dans leur mise en œuvre. À cet égard, l'état actuel de la reconstruction post-catastrophe à la suite des ouragans Irma et Maria dans les Petites Antilles montre les difficultés à concilier les deux impératifs de "reconstruire plus vite" et de "reconstruire mieux".

Les îles de Saint-Martin et de Saint-Barthélemy, dans les Antilles françaises, sont régulièrement touchées par des ouragans et des submersions marines. Malgré d'indéniables similitudes, ces deux îles présentent de nombreuses différences. La différence la plus importante est la gestion des catastrophes naturelles. Depuis 2011, l'urbanisation en zone soumise à des risques naturels est réglementée à Saint-Martin à travers un Plan de prévention des risques naturels (PPRN). Aucune réglementation n'existe en ce sens sur Saint-Barthélemy. En s'appuyant sur l'analyse de campagnes de photographies aériennes entre 1954 et 2017, des cartes d'évolution de la construction et de l'urbanisation ont été élaborées sur ces 2 îles. En parallèle, la connaissance des aléas, et principalement des submersions marines générées par les ouragans, ont évolué au cours du temps. L'analyse spatiale croisée d'une part des données d'occupation des sols, et d'autre part de la connaissance des zones exposées à la submersion, nous permettent de proposer une analyse comparative des stratégies d'aménagements moyenterme en zone à risque mises en place sur chacune des 2 îles. Concernant les zones de submersion marine, de nombreux bâtiments ont été construits entre 1954 et 2017. Ce nombre de bâtiments augmente progressivement avec le temps pour ces deux îles.

Alors que Saint-Barthélemy ne montre que peu d'influence des lois de défiscalisation pour l'investissement à l'Outre-Mer (ex : loi Pons, 1986) sur les constructions situées sur les zones de submersion marine, Saint-Martin montre une mise en danger progressive de ses populations : de nombreuses constructions sont réalisées à partir de 1986 dans ces zones à risque. Saint-Barthélemy a opté pour un tourisme de luxe à la différence de Saint-Martin qui a un tourisme de masse. Pour développer sa stratégie de tourisme, Saint-Martin a été obligé de répondre à une exigence touristique passant outre les règles de sécurité dictées par le PPRN. Inversement, le modèle de tourisme de luxe présent sur Saint-Barthélemy semble avoir limité le taux de construction en première bande côtière.

Mots-Clés : Ouragan, submersion marine, risques naturels, aménagement des territoires

*Intervenant



Long-term (1900-2100) SWE and Hydrometeorological reconstructions in the French Southern Alps (Mercantour Natural Parc)

T. Mathevet^{*,1}, C. Thebault², J. Mansons³, M. Le Lay¹, A. Valery¹, A. Brenot¹, J. Gailhard¹

1 : EDF DTG, Hydrometeorological services, 134, chemin de l'Étang, 38950 Saint Martin le

Vinoux² : Student at PolytechNice Sophia, stagiaire à EDF DTG, été 2019

3 : Mercantour National Parc, 23 rue d'Italie, 06006 Nice Cedex 1

The aim of this communication is to study climate variability and change on snow water equivalent (SWE) and streamflow over the 1900-2100 period. It is based on SWE and streamflow observations, past reconstructions (1900-2018) and future GIEC scenarii (upto 2100) of some snow courses and hydrological stations situated within the French Southern Alps (Mercantour Natural Parc). This study has been conducted by EDF (French hydropower company) and Mercantour Natural Parc.

This issue became particularly important since a decade, especially in regions where snow variability had a large impact on water resources availability, poor snow conditions in ski resorts and artificial snow production or impacts on mountainous ecosystems (fauna and flora). Considering snow and streamflow observations within Mercantour region, this communication focuses on: (1) long term (1900-2018) analyses of variability and trend of hydrometeorological and snow variables (total precipitation, air temperature, snow water equivalent, snow line altitude, snow season length, streamflow regimes) , (2) long term variability of snow and hydrological regime of snow dominated watersheds and (3) future trends (2020 -2100) using GIEC Climate Change scenarii.

Comparing former period (1950-1984) to recent period (1984-2018), quantitative results within these regions roughly shows an increase of air temperature by 1.2 °C, an increase of snow line height by 200m, a reduction of SWE by 200 mm/year and a reduction of snow season duration by 15 days. Characterization of the increase of snow line height and SWE reduction are particularly important at a local and watershed scale. Then, this communication focuses on impacts on long-term time scales (2050, 2100). This long term change of snow dynamics within mountainous regions both impacts (1) water resources management, (2) snow resorts and artificial snow production developments or (3) ecosystems dynamics. This study allowed to provide some local quantitative scenarii. Correlated impacts on hydrological regimes and some hydrological variables are also shown.

Mots-Clés : Snow ; Hydrology ; Hydrometeorological variability ; Alps ; Climate change



Evolution des versants rocheux alpins en moyenne montagne et changement climatique

Chloé Maréchal ^{1*}, Pascal Allemand ¹, Sophie Passot ¹

¹ Laboratoire de Géologie de Lyon – Terre, Planètes Environnement, Université de Lyon, Université Lyon 1, ENSL, CNRS, F-69622 Villeurbanne, France

Dans les Alpes, le changement climatique récent est responsable de l'augmentation de la température moyenne régionale, de la diminution de l'enneigement, et, en haute altitude (au-dessus de 2500 m), de l'accélération de la fonte des glaciers, de la fonte du pergélisol, et de l'augmentation des écroulements rocheux. Ces changements modifient les processus d'érosion et les quantités de sédiments mobilisés le long des versants. En moyenne montagne (classiquement entre 800 m et 2000 m), les effets du changement climatique sont moins connus. Or les pierriers de pied de falaise sont des lieux d'activité érosive sensibles aux variations du climat. Si le climat évolue, il est probable que l'activité des pierriers montre également une évolution sur plusieurs décennies.

Notre étude porte sur l'évaluation des changements de pieds de falaises de massifs carbonatés de trois zones géographiques des Préalpes françaises : le massif de la Chartreuse (Isère), le massif du Vercors (Isère), dans le nord, et le Mont Ventoux (Vaucluse), dans le sud. Ces sites, d'une altitude similaire (entre 1200 m et 1900 m), s'étalent sur une distance de plus de 250 km : ils sont localisés dans des contextes climatiques relativement différents.

L'analyse de séries temporelles d'ortho-images de l'IGN de ces sites, construites à partir de photographies aériennes acquises environ tous les 10 ans depuis les années 1950, permet d'évaluer l'évolution de l'étendue de la surface des pierriers au cours du temps (extension *versus* contraction). En ce sens, la colonisation (ou la décolonisation) des pierriers par la végétation est un indicateur du degré d'activité des pierriers et/ou de la dynamique végétative, l'un et l'autre pouvant être liés au changement climatique. D'autre part, l'étude des données quotidiennes de température, de précipitations (liquides et solides), et d'évapotranspiration, de stations météorologiques, couplée à l'étude du modèle de surface SAFRAN (Météo France) pour ces mêmes paramètres, de 1950 jusqu'à nos jours, permettent de cerner l'évolution climatique en cours depuis le milieu du XX^{ème} siècle sur les trois sites. Les résultats, ainsi que la discussion sur les liens entre le climat et les changements de surface des pierriers, seront proposés à l'occasion de la présentation de cette étude.

Mots-Clés : Pierriers, Falaises, Végétation, Climat, Moyenne montagne.

*Intervenant



T5.7 H2 natif



Production d'H₂ par altération de la ferrobrucite en contexte ophiolitique : approche thermodynamique.

William Carlin^{*1,2}, Benjamin Malvoisin¹, Tiphaine Fargetton², Laurent Jeannin² et Fabrice Brunet¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, ISTerre, 38000 Grenoble, France

² Storengy (ENGIE), 12 Rue Raoul Nordling, Bois-Colombes, France

La ferrobrucite, $(\text{Mg,Fe})(\text{OH})_2$, est un produit commun des réactions de serpentinisation associées à l'hydratation des roches ultrabasiques. Initialement produite dans des conditions réductrices (typiquement $< \text{FMQ}-2$), l'altération en condition de surface de la ferrobrucite est susceptible de générer, à nouveau, des conditions réductrices pouvant s'accompagner de la production d'H₂. Ce type de réaction de basse température ($< 100^\circ\text{C}$) a été proposé pour rendre compte de l'H₂ émis à l'heure actuelle au niveau de l'ophiolite d'Oman. Nous proposons, à partir d'une analyse thermodynamique, de déterminer la capacité d'une serpentinite contenant de la ferrobrucite à produire de l'H₂ lorsque celle-ci est soumise à une altération de type supergène. Les résultats de la modélisation thermodynamique seront confrontés aux données de composition (e.g. teneur en fer) et de microtexture de ferrobrucite observée dans des échantillons collectés dans le cadre de l'Oman Drilling Project. Cette comparaison permettra de déterminer la contribution potentielle de l'altération de la ferrobrucite à la production d'hydrogène observée au niveau de l'ophiolite d'Oman.

Mots-Clés : ferrobrucite, altération, H₂, ophiolite, basse température



New evidences for H₂-rich gas seepages in New-Caledonia

E. Deville², G. Paita^{1,2}, I. Moretti^{1,3}, O. Sissman², J. Jeanpert⁴

¹ ENGIE, 1 Place Samuel de Champlain, Paris La Défense, France

² IFP Energies nouvelles, 92852 Rueil-M. Cedex, France

³ UPPA - E2S, France

⁴ Service Géologique de Nouvelle-Calédonie, DIMENC, 1^{er} rue Unger, BP M2, 98849 Nouméa

The results of a recent study complete previous works made on natural hydrogen in the ophiolitic nappes of New-Caledonia. Gas seepages are present in various places and they are associated to the deposition of carbonate deposits. The gases are H₂-N₂-CH₄ mixtures seeping into ultrabasic spring water (pH ~ 10-11; temperatures between 30 and 40°C). This type of gases shows H₂ contents between 12 and 34%, N₂ between 50 and 80%, and CH₄ between 9 and 18%. Close to the sole thrust of the ophiolites, the H₂ contents decrease and the N₂ contents increase. The isotopic values of H₂ and CH₄ correspond to classical values in high pH springs in ophiolitic massifs. The origin proposed to explain these emanations of H₂ is a process of oxidation of Fe(II) present in the ophiolitic rocks and reduction of the water present in the fractures system of the ophiolites. The methane, due to high C1/C2 ratios (between 5000 and 13000), is interpreted as the result of methanogenesis by reaction between H₂ and inorganic carbon present in subsurface. δ¹³C of CH₄ is a little higher compared to classical microbial gas and it is in accordance with those obtained in natural H₂-rich gas seepages in the Oman ophiolite. H₂ measurements using detectors made in lateritic soils (perforations ~ 1m) showed low levels of H₂ concentration. An autoclave experiment was made, in which 5 g of laterites were mixed with 150 ml of neutral water, with argon and hydrogen at constant pressure and temperature (temperature of 80°C). In this experiment, the laterite powder was kept in contact with water and argon by a stirrer. The results of this experiment suggest a mineral consumption of H₂ which, in addition to a probable microbial consumption of H₂, could also explain the absence of H₂ in the lateritic shallow layers, even though H₂ is probably regionally generated at depth.

Keywords : New Caledonia, ophiolite, gas composition, isotopes, hydrogen, carbonates



Hydrogen reactivity with an aquifer – PHREEQC geochemical thermodynamics calculations

Nicolas Jacquemet ^{*1}, Pierre Chiquet ², Arnaud Grauls ²

¹ Independent researcher/consultant in hydrogeochemistry and reactive transport - France

² Teréga - France

TEREGA has been using for 60 years an aquifer in southwestern France to store natural gas. This would be a potential host for hydrogen co-storage. In this context, we evaluated through PHREEQC geochemical thermodynamics calculations the possible rock-fluid interactions and their consequences on the reservoir porosity.

The following reactions were predicted: methanogenesis (conversion of carbonates to methane), accompanied by an alkalisation of the water; ferric iron; sulphate; disulphide; and nitrogen reductions by hydrogen. These reactions led to the reductive dissolutions of the reservoir rock minerals calcite, goethite, barite and pyrite. Dissolution of kaolinite was also predicted, due to the alkalisation of the water. The released elements/compounds precipitated as iron sulphide and zeolite minerals while baryum and sulphides accumulated in the water. The mineral dissolution-precipitation reactions did not affect significantly the reservoir porosity.

These results need to be put in perspective regarding the maximizing assumptions of constant hydrogen fugacity and thermodynamic equilibrium reaching. Our study could be improved by: (i) including kinetics for hydrogenotrophic microbial metabolic as well as for mineral dissolution-precipitation reactions; (ii) considering the advective-dispersive-diffusive transport of hydrogen within aquifer. Our modelling results will be compared to the outcomes of the laboratory tests of the R&D project RINGS (Research on the Impact of New Gases in Storages).

Mots-Clés : underground hydrogen storage, aquifer, gas-water-rock interactions, methanogenesis, iron reduction, sulphate reduction, hydrogeochemical modeling, PHREEQC



Variabilité dans le temps et l'espace de la concentration d'H₂ : Apport d'un modèle conceptuel de transport 2D.

Andrey Myagkiy^{1*1,3}, Isabelle Moretti^{2,4}, Fabrice Brunet¹,

¹Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, ISTerre, Grenoble, France
²ENGIE SA – France

³Now at Storengy, France

⁴Now at E2S UPPA, Pau, France

Des émissions de H₂ du sol ont maintenant été notées à de nombreux endroits, elles sont localisées sur des failles ou plus diffuses dans certains bassins sédimentaires, généralement Protérozoïques. Dans ce dernier cas, les émanations sont visibles à partir d'images satellites ou de cartes topographiques à haute résolution puisqu'elles correspondent à de légères dépressions ; la végétation est affectée, souvent détruite et la forme de la structure est circulaire ou elliptique. Les mesures de la concentration de H₂ dans le sol, lorsque le gaz s'échappe des bassins sédimentaires, semblent aléatoires. Le maximum n'est presque jamais au centre de la structure ; les données acquises montrent que la concentration en H₂ du sol est variable dans l'espace et dans le temps. Sur la base d'une modélisation du transport de H₂ dans le sol, nous proposons une explication à cette variabilité ; les caractéristiques de cette concentration qui pourraient paraître aléatoire sont principalement dues à l'émission non constante de H₂, la consommation de H₂ dans le sol et aux hétérogénéités du sol. La taille de la structure émettrice est liée au temps de transit de l'hydrogène dans le sol, qui est influencé à la fois par la perméabilité du sol, par la profondeur de la fuite initiale de gaz et par la pression de bulle. L'hétérogénéité des perméabilités des sols entraîne une distribution non homogène de la concentration d'H₂. Les zones particulièrement moins perméables situées au centre des structures entraînent une augmentation de la concentration vers les limites de la structure et un signal proche de zéro au centre, comme observé sur le terrain. Si le signal source est régulier avec une fréquence horaire inférieure à quelques heures, un signal quasi constant peut être atteint. Dans les autres cas, le signal proche de la surface reflète le signal source en profondeur avec un retard (d'environ 12 heures pour 30 m de sol) et les valeurs proches de la surface varient selon l'horaire des mesures. Une surveillance permanente du sol, de même que la connaissance de sa perméabilité, sont donc indispensables pour interpréter les données proches de la surface en termes de débit d'H₂.

Mots-Clés : Hydrogène, émission, concentration, modélisation



Reactive percolation experiments of the co-valorization of carbon dioxide geological storage through hydrogen production in ultramafic formations.

Florian Osselin^{*1}, Michel Pichavant¹, Hugues Raimbourg¹, and Marc Ulrich²

¹ ISTO, Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, UMR7327, CNRS/BRGM/Université d'Orléans

² ITES, Institut Terre et Environnement de Strasbourg, UMR7063, Université de Strasbourg/CNRS/ENGES

The discovery of deep ocean smokers revealed the importance of hydrogen in the global mass balance between the upper mantle, the oceanic crust and the ocean, as well as its fundamental role in the deep ocean biosphere. Nowadays, hydrogen is also highly regarded as a potential replacement for fossil fuel in a growing number of applications. In parallel, the development of geological carbon dioxide storage technologies highlighted the potential of ultramafic formations as a recipient for CO₂ mineralization due to their high reactivity (peridotite+CO₂ = carbonates+silica), offering huge storage capacities, 10 to 100 times larger than the required amount for climate stabilization, and with no risk of leakage back to the surface. The combination of these two phenomena appears then as a natural development, allowing the offset of the carbonation costs in ultramafic formations by the production of clean and natural hydrogen fueling the energy transition, in a process where CO₂-rich brine is injected in the formation and an H₂-rich fluid is extracted from the other side

In this study, we present several reactive percolation experiments in natural serpentinite cores from the South-West Indian Oceanic Ridge, with fluids either NaCl-only or NaCl-NaHCO₃ brine. The purpose was to analyze the influence of parameters such as temperature, pressure, inlet solution composition on the hydrogen production as well as the CO₂ storage efficiency.

Results show that the carbonation leads to a fast and complete clogging of the cores by the precipitation of carbonates in the main percolation paths. On the contrary, NaCl-brine experiments presented a steady but much slower decrease in permeability. However, despite the fast clogging, carbonation extent reached interesting levels, e.g. 31% efficiency at 280°C and 200 bars. On the other hand, hydrogen production presents lower levels in the CO₂ experiments than in the CO₂-free experiments, highlighting competition between iron oxidation and its incorporation in the secondary phases.

These results will not only help understand the complicated coupling between hydrogen formation and CO₂ storage in a potential industrial development of the technology, but also help describe the interplay of serpentinization and carbonation in natural settings such as mid-oceanic ridges or subduction zones.

Mots-Clés : Natural Hydrogen, CO₂ sequestration, reactive percolation experiments, serpentinization



Projet DjiboutHy – évaluation de la ressource en hydrogène naturel et en hélium mantellique dans le triangle des Afars (Djibouti)

Christophe Rigollet¹, Eric Deville², Kadar Mohamed Hassan³, Isabelle Moretti⁴,
Nicolas Pélissier⁵ et Alain Prinzhofer⁶

1 – CVA, France

2 – IFPEN, France

3 – Office Djiboutien de Développement de l'Energie Géothermique,

Djibouti⁴ – UPPA, France

5 – 45-8 ENERGY, France

6 – GEO4U, Brésil

Le territoire de la République de Djibouti est situé dans la dépression de l'Afar, à la rencontre de trois rifts : le rift océanique de la Mer Rouge, le rift océanique du Golfe d'Aden et le rift continental Est Africain. Dans la prolongation du Golf d'Aden, l'ouverture du Golfe de Tadjourah ce dernier million d'année a été suivie par la mise en place de dépressions parallèles orientées NW-SE (Gobaad, Hanlé, Gaggade, Asal-Ghoubbet). Cette région est caractérisée par un flux de chaleur élevé, par une activité volcanique et tectonique complexe et un réseau dense de failles favorable au développement de systèmes hydrothermaux. Cette configuration est favorable à l'exploration de multiples ressources comme les minéralisations hydrothermales, la géothermie et l'hydrogène naturel (G. Pasquet et al., 2021).

Une mission menée par les auteurs de cette présentation et les ingénieurs de l'Office Djiboutien de Développement de l'Energie Géothermique en Mars et Avril 2021 a confirmé la présence d'indices d'hydrogène naturel sur plusieurs sites et a également permis de mettre en évidence la présence d'hélium mantellique sur les rives du lac Abbhé.

- Les émanations d'hydrogène naturel ont été détectées au niveau de fumerolles et sources d'eau chaude associées à des systèmes hydrothermaux sur les bordures des dépressions de Gobaad, Hanlé, Gaggade, Asal-Ghoubbet ainsi qu'à Arta, grâce à l'utilisation du capteur GA5000. Des prélèvements et analyses par chromatographie en phase gazeuse ont montré que les proportions d'hydrogène pouvaient dépasser 1500ppm dans la zone d'Asal-Goubet. Les analyses réalisées à l'IFPEN montrent que le méthane associé à l'hydrogène est abiotique et pourrait donc résulter de la réaction de l'hydrogène avec le CO₂ mantellique (réaction de Sabatier).
- Les émanations d'hélium ont été observées notamment sur les rives du lac Abbhé (dépression de Gobaad) dans des sources d'eau chaude en ébullition (>100°C). Les chromatographies en phase gazeuse réalisées par 45-8 ont montré des teneurs en hélium qui dépassent 200 ppm. Les analyses isotopiques réalisées à l'IFPEN sur les mêmes échantillons mettent en évidence un rapport isotopique R/RA de 7, qui est une valeur caractéristique de l'hélium d'origine mantellique (8+/-1).

Les valeurs mesurées d'hydrogène naturel et d'hélium correspondent à des indices de surface. Ils permettent de faire l'hypothèse d'accumulations plus en profondeur, mais ne permettent pas d'évaluer la ressource. Pour cela une campagne d'exploration géologique et géophysique suivie de forages exploratoires sont nécessaires. C'est l'objet du projet d'exploration DjiboutHy, initié par l'ODDEG, qui a pour objectif de comprendre les mécanismes de genèse et d'accumulation de l'hydrogène et de l'hélium à Djibouti. Si la ressource est confirmée, l'hydrogène naturel et l'hélium 3, en co-valorisation de l'énergie géothermale, pourraient représenter un intérêt économique pour Djibouti et contribuer à la décarbonation de son mix énergétique.

Référence : G. Pasquet et al., 2021, Correlation between high-temperature geothermal energy And natural hydrogen generation in the Asal Rift, Republic of Djibouti and in Iceland, Réunion spécialisée



de la Société Géologique de France, Paris



PARHyS System: a new approach to H₂ concentration measurements in the subsurface

Maria Rosanne ^{*1}, Fabian Rupin ¹, Louis Gorintin ¹, Julio Aguilar ¹, Hélène Buee¹, Julien Werly ¹, Olivier Lhote ², Jan Mertens ²

¹ Lab Nanotechnology, Sensors & Wireless, ENGIE-CRIGEN, France

² Key program natural H₂, ENGIE research, France

Surface H₂ concentration data can help to detect sites of interest for a better understanding of the natural H₂ phenomenon.

ENGIE-CRIGEN has developed a technology for continuous hydrogen measurement: PARHyS system enable to analyze gases pumped in the soil at a depth of 1 m.

The core of the PARHyS system is composed of an Hydrogen selective miniature sensor, with a soil gas sampling unit associated with humidity and temperature compensating sensors and a radio frequency transmitter, allowing data acquisition from the sensors via a LoRa concentrator. The data should then be collected on any remote location thanks to a satellite connection.

As for all sensors, the direct measurement of the H₂ concentration provided by the H₂ sensor is dependent on temperature (and possibly humidity) and so need to be calibrated. It is therefore important to check that the calibration of the H₂ sensors done internally is sufficiently accurate: tests were carried out by an third party laboratory which characterized 3 PARHyS systems for concentrations equal to 100 and 800 ppm. The global dynamic of the system is from 10 to 2000 ppm.

The results show a full-scale dispersion of 0.3 for the temperature range between 15 and 35°C and a relative humidity between 40 and 90% and were not-temperature dependent. The accuracy can be optimized in a targeted temperature range.

Indeed, if we focus on temperatures between 20°C and 32°C for wet gases, we can observe that dispersion does not exceed 0.23 regardless the concentrations and deviation could reach overestimation by 0.2 for 100 ppm and underestimation by 0.3 for 800 ppm. Additionally, there is no interference to CH₄ and CO₂ on H₂ concentration measurement and no obvious correlation between H₂ concentration and gas relative humidity from 40 and 70%HR as expected according to the manufacturer's specifications.

The continuous field measurements carried out in Brazil over a period of 5 months (from September 2019 to May 2020, where the sensors were exposed to extreme weather conditions, show good robustness and highlight potential ways to optimize PARHyS system.

Mots-Clés : Natural H₂ measurement, Sub surface, PARHyS sensor



T6.2. Archéométrie, archéologie



La variabilité des roches rouges et jaunes collectées au Magdalénien à Pincevent : genèse, sélection et altération.

Aurélie Chassin de Kergommeaux ^{*1}, Magali Rossi ¹, Hélène Salomon ¹, Jean-Jacques Delannoy ¹, Emilie Lesvignes ², Quentin Lemasson ³, Claire Pacheco ³, Laurent Pichon ³, Caroline Peschaux ², Gaëlle Dumarçay ², Olivier Bignon-Lau ², Emilie Chalmin ¹

¹ Laboratoire Environnement et Dynamique des Territoires de Montagne (EDYTEM) – CNRS : UMR5204, Université Savoie Mont Blanc – France

² Archéologies et Sciences de l'Antiquité (ArScAn) – CNRS : UMR 7041, Université Paris I Panthéon-Sorbonne – France

³ Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF) – Ministère de la Culture, Palais du Louvre – France

Dans les niveaux magdaléniens de Pincevent (Seine-et-Marne) des roches colorantes ou colorées rouges et jaunes de diverses lithologies (grès, quartzites, conglomérats ferrugineux, calcaires chauffés, calcaires oolithiques ferrugineux de type Clinton...) ont été retrouvées dans différents contextes et sous différentes formes (blocs en bordures de foyer, petits fragments, rondelles...). L'étude des provenances de ce matériel semble appuyer les recherches précédentes démontrant la connaissance approfondie des sociétés préhistoriques pour ce qui est des propriétés des matières sélectionnées (couleur, résistance, homogénéité, texture, exploitabilité) et de leur accessibilité dans des espaces minéraux théoriques vastes. Se réapproprier ces connaissances, en déterminant les origines géologiques et géographiques des matières colorantes, est complexe notamment du fait de leurs modifications naturelles et anthropiques non prises en compte dans les études précédentes. Cependant reconnaître les sources de matières premières permettrait d'appréhender les dynamiques de ces sociétés de chasseurs-collecteurs à travers la mise en évidence des relations entre les différents lieux fréquentés (gisements de matières premières et habitats).

De leur genèse à leur redécouverte, les roches riches en fer ont subi de nombreuses modifications de caractéristiques intrinsèques sur le lieu de leur formation (circulations de fluides et altération météorologique), sur un autre lieu de collecte (transport, dépôt), lors de leur transformation et utilisation (chauffe, mise en forme ou en poudre, mélange) ou encore après abandon (dissolution, corrosion, recouvrement, encroûtement). Toutes ces modifications se surimposent et peuvent en effacer d'autres.

Déconvoluer le signal de ces modifications et discriminer de manière morphologique, structurale, lithologique, minéralogique et chimique ces caractéristiques génétiques et acquises en utilisant des méthodes non invasives et non destructives tels le MEB-EDS, la μ -DRX, le PIXE est crucial en contexte archéologique. Ceci permettra de mettre en évidence les modifications volontaires et préciser les objectifs d'exploitation en fonction de la matière et de leurs contextes d'utilisation et à terme de comparer les pratiques et les espaces fréquentés au cours du temps.

Mots-Clés : roches contenant du fer, pétrologie, caractérisation géochimique, modifications géochimiques et pétrographiques, approvisionnement, Paléolithique supérieur





Incas et séismes : reconcevoir le risque dans la région de Cusco au travers de l'archéosismologie

Andy Combey ^{*1}, Laurence Audin ², Carlos Benavente Escóbar ³, David Gandreau ⁴, Miguel Ángel Rodríguez-Pascua ⁵, José Bastante ⁶

¹ PhD CDP Risk, ISTerre/Université Grenoble Alpes – France

² ISTerre/Université Grenoble Alpes – IRD – France

³ INGEMMET Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – Pérou

⁴ ENSAG Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble/CRAterre – France

⁵ IGME Instituto Geológico y Minero de España – Espagne

⁶ Directeur du Parc archéologique de Machu Picchu – Pérou

A la différence de la très médiatique sismicité de marges actives, la sismicité intra-plaque souffre d'un criant déficit de recherches, et cela malgré le risque qu'elle fait peser sur des millions de personnes de par le monde (England and Jackson, 2011). Située à 400 km à l'est de la zone de subduction de Nazca au Pérou et des nombreux séismes destructeurs qui l'agitent (Lima, 1746 ; Arica, 1868), la région de Cusco est pourtant traversée par un vaste complexe de failles crustales sismiques (1650, 1950, 1986). Ces dernières représentent un danger latent et un aléa peu étudié pour les populations andines particulièrement vulnérables.

Célèbres pour leurs constructions mégalithiques cyclopéennes, les Incas (XIV-XVe s.) sont souvent considérés comme les inventeurs d'une architecture parasismique sans que cela ait été démontré formellement. Qu'en est-il cependant de leur expérience à l'égard des tremblements de terre ? En l'absence complète de documents historiques de l'époque précolombienne, les sites archéologiques s'avèrent être un marqueur prometteur pour évaluer l'activité sismique passée.

Pour la première fois en Amérique du sud a été conduite une prospection archéosismologique de grande ampleur, avec pour objectif d'accroître le catalogue régional et d'interroger la gestion du risque à l'époque Inca. Nous avons ainsi mis au point une base de données destinée à recenser les dommages d'origine sismique observables dans le bâti archéologique et de fournir un support adapté à une analyse statistique des données.

Les premiers résultats suggèrent l'occurrence d'au moins un épisode sismique durant l'Horizon Récent (1400-1533 apr. J.-C.) et plaident pour une réévaluation des interprétations archéologiques actuelles. En jetant un nouveau regard sur la relation complexe entre Incas et tremblements de terre, nos recherches contribueront à ajuster les modèles locaux d'estimation du risque sismique et s'avéreront cruciales dans la conception de sociétés andines plus résilientes.

Mots-Clés : Archéosismologie, Géorisque, Culture sismique, Inca, Cusco



Apport des géosciences en archéologie minière : l'exemple de Brandes (commune d'Huez, massif des Grandes Rousses)

Jean-Paul Deroin ^{*1}, Étienne Deloule ², Christian Marignac ³, Marie-Christine Bailly-Maître ⁴

¹ EA 3795 GEGENAA et FR CNRS 3417 Condorcet – Université de Reims - France

² UMR 7358 CNRS-Université de Lorraine – CRPG - France

³ UMR 7359 GeoRessources, CNRS-Université de Lorraine - France

⁴ UMR 7298 LA3M CNRS-Aix-Marseille Université - France

À Brandes, le village et les installations de l'entreprise minière (XIe-XIVe siècles) constituent un site archéologique exceptionnel. Les enquêtes du Moyen Âge indiquent que les mines de l'Oisans étaient riches en argent, fer, cuivre et plomb. Uniquement aux alentours de Brandes, on dénombre une quinzaine de secteurs miniers, principalement exploités pour l'argent recherché pour le monnayage (mines Saint-Nicolas, de l'Écluse, du Lac Blanc, du Milieu, etc.). Afin de mieux comprendre l'ensemble de la chaîne opératoire, les méthodes des géosciences ont été mises en œuvre, à savoir : la cartographie et la géologie structurale, pour mieux contraindre le contexte géologique local, la géométrie des filons exploités ainsi que leur méthode d'exploitation ; la pétrologie et la minéralogie afin de caractériser les minerais, leur encaissant et leur teneur en métaux ; la géochimie isotopique afin de mieux cerner la source des métaux et l'âge de leur mise en place.

L'analyse structurale de terrain précise que les minéralisations sont filoniennes, au sein de roches métamorphiques ou, plus rarement, de dolomites du Trias. Trois familles de direction sont dominantes : E-W, N.060°E, N.140°E. L'analyse minéralogique met en évidence un assemblage à quartz-barytine-galène-sulfosels (type I), ainsi qu'un assemblage à sphalérite-galène-sulfosels-quartz (type II), plus rare. La galène a constitué le principal minerai d'argent (associé à l'antimoine). Les cuivres gris argentifères et la bournonite ont également pu fournir une partie de l'argent. Une comparaison aux âges modèles donne de 70 Ma à 350 Ma. Ceci indique que le plomb des galènes résulte d'un mélange de deux sources : hercynienne et alpine. Des monnaies delphinales du XIII^e siècle montrent des rapports isotopiques identiques à ceux obtenus sur le minerai de Brandes.

Brandes se révèle être un site majeur pour l'archéologie minière, mais aussi important pour les connaissances géologiques régionales et les études environnementales.

Mots-Clés : géoarchéologie ; tectonique ; métallogénie ; géochimie ; Moyen Âge ; mines ; argent ; Oisans ; Isère



Géochronologie ^{14}C et géochimie isotopique appliquées aux instruments de musique modernes. Une étude interdisciplinaire

Marie-Gabrielle Durier ^{*1,2}, Christine Hatté ¹, Alexandre Girard-Muscagorry ²,
Martine Paterne ¹, François Thil ¹, Stéphane Vaiedelich ²

¹ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'environnement (LSCE/IPSL, CEA CNRS UVSQ) – CNRS : UMR8212, Université Paris-Saclay – France

² Équipe Conservation-Recherche, Musée de la Musique – CNRS : USR3224, Centre de recherche sur la conservation – France

Bien que la géochronologie ^{14}C soit répandue en archéologie et paléoclimatologie, elle est peu appliquée aux collections muséales comme l'instrumentarium moderne (16^e au 19^e siècle). Il fallait dépasser les écueils de la taille de prélèvement (respectant l'intégrité des objets patrimoniaux), des protocoles adaptés aux matrices composites, et des courbes de calibration ^{14}C complexes. Nous présentons ici une méthodologie novatrice basée sur la combinaison d'expertises muséales et scientifiques avancées pour identifier les phases de manufacture, d'usage et de restauration d'instruments de musique modernes. Nous illustrons cette démarche par le cas d'une cithare sur table chinoise *qin* (inv. n° 276) déposée par le Conservatoire national des arts et métiers au Musée de la musique.

Ce *qin*, daté de 1712 d'après une inscription apposée sur le fond, a été étudié au Musée de la Musique à travers la documentation historique disponible et la caractérisation des matériaux (microscope optique, VIS/IR/UV, fluorescence X). À l'issue de cette investigation, le *qin* a été soumis à un micro- (de 0.2 à 1.4 mg) et multi-échantillonnage. On montre que trois échantillons en bois de différentes parties de l'instrument sont contemporains, contrairement à l'échantillon de corde en soie, et produisent deux plages de dates équiprobables antérieures à la période attendue du 18^e siècle : [1456AD - 1530AD] (43.1%) et [1541AD - 1635AD] (52.3%). L'interprétation des résultats par modélisation Bayésienne, complétée par la datation du vernis en cours, permet de discuter l'hypothèse selon laquelle le bois aurait été stocké plusieurs siècles.

Dans le cadre d'un projet doctoral, nous proposons de compléter la problématique de la datation des matériaux en facture instrumentale par celle de l'origine géographique grâce à l'apport de la géochimie isotopique courante en archéologie. Des tests de faisabilité visent à adapter la technique aux vernis historiques. Dans une perspective plus large, cette thèse ambitionne d'apporter des éléments nouveaux sur l'histoire des usages de l'instrument depuis sa sortie de l'atelier, ainsi que sur les pratiques de stockage et de commerce des liants organiques.

Mots-Clés : instruments de musique, qin, géochronologie ^{14}C , géochimie isotopique, vernis



Le textile, un marqueur chronologique pour l'Égypte ancienne : méthodologie d'extraction et de caractérisation pour la datation radiocarbone.

Marie Ferrant ^{* 1,2}, Emmanuelle Delqué-Količ ³, Roberta Cortopassi ⁴, Anita Quiles ²,
Ludovic Bellot-Gurlet ¹

¹ Laboratoire « De la Molécule aux Nano-objets : Réactivité, Interactions et Spectroscopies » (MONARIS), UMR8233 Sorbonne Université – CNRS, Paris - France

² Institut Français d'Archéologie Orientale (IFAO), Le Caire – Egypte

³ Laboratoire de mesure du carbone 14 (LMC14), CEA-CNRS-IRSN-IRD-UVSQ, Gif-sur-Yvette, France

⁴ Département des Antiquités Égyptiennes, Musée du Louvre, Paris, France

Les textiles sont abondamment retrouvés sur les chantiers de fouilles égyptiens et souvent dans de bons états de conservation, du fait du climat particulièrement aride du pays. Selon les usages auxquels ils sont associés, différents matériaux organiques exogènes sont susceptibles d'y être retrouvés imprégnés (baumes de momification, matériaux d'étanchéification, teintures...). Ces matériaux peuvent parfois s'avérer « contaminants » pour la datation C14, comme par exemple le bitume, à base de carbone fossile, qui vieillira systématiquement les échantillons s'il n'est pas extrait en amont.

Le travail de recherche présenté, ayant pour finalité la datation ¹⁴C du textile, vise à développer une approche inédite de caractérisation des matériaux et de datation par le radiocarbone, de façon diachronique et sur l'ensemble du territoire égyptien, afin de pouvoir intégrer ce matériau dans des modèles chronologiques. Au-delà, il cherche à restituer des pratiques techniques liées à l'usage de textiles en Égypte, afin d'évaluer des critères précis de représentativité archéologique pour chaque textile étudié.

Le développement analytique s'articule en quatre temps. Une première étude non destructive par spectroscopie infrarouge (FTIR) permettra de diagnostiquer la présence de matières organiques à extraire. Un protocole d'extraction en plusieurs étapes est ensuite nécessaire pour solubiliser l'ensemble des matériaux organiques susceptibles d'être « contaminants ». Une caractérisation moléculaire, combinant FTIR et chromatographie sur couche mince (CCM) documentera la nature des matériaux imprégnés tandis que la datation C14 du textile propre pourra finalement être réalisée.

Dans cette communication, nous présenterons la méthode de diagnostic FTIR envisagée pour les textiles ainsi que les résultats obtenus lors du développement de la méthodologie sur un corpus de textiles conservés au Département des Antiquités Égyptiennes (Musée du Louvre). Nous proposerons de premières datations réalisées sur des échantillons textiles jusqu'ici non datés et peu documentés, avant de conclure sur les nouvelles perspectives offertes par ce protocole intégré d'étude archéométrique de textiles anciens.

Mots-Clés : Spectroscopie infrarouge, datation C14, textiles, Egypte, chromatographie sur couche mince



Muographie d'un tumulus : problématiques liées à la simulation de l'ensemble expérimental.

T. Avgitas ¹, M. Chefdeville ², A. Chevalier ¹, A. Cohu ¹, S. Elles ², C. Goy ²,
Y. Karyotakis ^{*2}, J. Marteau ¹, M. Rosas-Carbajal ³

¹ Univ Lyon, Univ Claude Bernard Lyon 1, CNRS/IN2P3, IP2I Lyon,

² Laboratoire de Physique des Particules d'Annecy (LAPP), Univ Grenoble Alpes, Univ Savoie Mont Blanc, CNRS/IN2P3, Annecy, France

³ Univ de Paris, Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), CNRS, Paris, France

Une expérience de tomographie par des muons issus de rayons cosmiques a été conduite sur un site archéologique en Grèce, un tumulus. Cette contribution se propose de présenter les problématiques liées à la simulation de l'expérience et du site par des outils communément utilisés en physique des particules. L'objectif scientifique est de comparer les résultats de la simulation avec les données enregistrées pour mettre en évidence des anomalies.

La simulation utilisée s'appuie sur les outils de physique des hautes énergies comme Geant4 (GEometry And Tracking) un logiciel de simulation du passage de particules à travers la matière ou encore Corsika, un logiciel de simulation des rayons cosmiques. Trois aspects sont à distinguer :

- la simulation du détecteur et de sa réponse.
- la simulation du site archéologique.
- la simulation du flux de muons issus de rayons cosmiques

Si le premier aspect est particulièrement bien maîtrisé, dans le contexte évoqué ici, les deux autres revêtent un caractère plus novateur dont les particularités seront exposées : prise en compte de la morphologie du terrain, contraintes liées à la géométrie des tumulus, optimisation de la simulation, limites à la génération de muons quasi-horizontaux.

Mots-Clés : Rayons cosmiques, simulation, Geant4, tomographie, tumulus, archéologie, Corsika, muon



Applications archéologiques des recherches en archéomagnétisme menées à l'institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) et au Laboratoire d'Archéologie Moléculaire et Structurale (LAMS)

Yves Gallet ^{1*}, Agnès Genevey ², Maxime Le Goff ¹, Nicolas Warmé ³, Alexandre Fournier ¹

¹ Université de Paris, Institut de Physique du Globe de Paris, CNRS, Paris, France

² Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire d'Archéologie Moléculaire et Structurale, Paris, France

³ Institut National de Recherches Archéologiques Préventives, La Courneuve, France

Les études archéomagnétiques que nous menons à l'IPGP et au LAMS visent à caractériser la nature des variations temporelles du champ géomagnétique au cours des derniers millénaires, principalement en France et au Proche-Orient. Les analyses portant sur les intensités géomagnétiques, qui sont réalisées à partir de fragments de céramiques, nous permettent désormais de construire des courbes régionales de variation séculaire avec une résolution qui était jusqu'à très récemment totalement inaccessible. Les applications qui en découlent concernent à la fois des thématiques géomagnétiques et l'archéologiques, avec notamment des possibilités nouvelles de datation des productions céramiques. Concernant les directions archéomagnétiques, nos travaux se concentrent sur les structures de combustion trouvées in-situ sur le territoire métropolitain. Après 25 ans d'acquisition de nouveaux résultats en collaboration avec l'INRAP, nous venons de mettre à jour la base Française des données directionnelles datées des deux derniers millénaires. La courbe moyenne qui en résulte est un outil remarquable pour la datation des structures de combustion mal datées par l'archéologie. Nous illustrerons cette application par plusieurs exemples récents de datation archéomagnétique.

Mots-Clés : Archéomagnétisme, champ géomagnétique, Archéointensité, Archéodirection, chronologie, datation



Magnétisme et archéologie : une approche intégrée pour des avancées en archéologie et en géophysique

Bruno Gavazzi ^{*1}, Frédéric Colin ², Marc Munsch ¹

¹ Institut de physique du globe de Strasbourg (IPGS) ; UMR 7516, Université de Strasbourg/EOST, CNRS - France

² Archéologie et histoire ancienne : Méditerranée – Europe (Archimède) ; UMR 7044, Université de Strasbourg, Université de Haute Alsace, CNRS - France

La cartographie magnétique est aujourd'hui un outil fréquemment utilisé pour l'imagerie de la proche surface en contextes archéologiques. Différents équipements et stratégies de mesure existent pour produire des cartes de pseudo-gradient (gradiomètres scalaires ou de composante verticale) ou d'anomalie de l'intensité du champ total (magnétomètres scalaires ou à trois composantes). Dans chacun des cas, qui présentent forces et faiblesses, les cartes sont interprétées visuellement et peuvent fournir de précieuses informations pour l'étude archéologique.

Il est proposé ici d'aller plus loin que cette approche outil à travers une meilleure intégration entre sciences archéologiques et géophysiques : les avancées en métrologie et méthodes d'interprétation quantitatives contribuent aussi bien à l'interprétation archéologique que cette dernière fournit des preuves terrain pour mieux contraindre à la fois les modèles de répartition en 3D des sources et aimantations et les méthodes quantitatives.

Cette approche est illustrée à travers son application sur le site de Qasr'Allam en Égypte, qui a permis entre autres d'identifier, de cartographier et de dater un des plus anciens chenaux d'irrigation connus du Sahara ainsi que de proposer une méthode d'estimation de la profondeur des sources par l'introduction d'un facteur de forme au signal analytique à deux dimensions.

Mots-Clés : Magnétisme, archéologie, systèmes d'irrigation, signal analytique



Archeointensity-based dating method: Examples from France and the Near-East

Agnès Genevey ^{1*}, Yves Gallet ², Erwan Thebault ³, Philip Livermore ⁴,
Alexandre Fournier ²

¹ Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire d'Archéologie Moléculaire et Structurale, Paris, France

² Université de Paris, Institut de Physique du Globe de Paris, CNRS, Paris, France

³ Université Clermont Auvergne, CNRS, IRD, OPGC, Laboratoire Magmas et Volcans, F-63000 Clermont-Ferrand, France

⁴ School of Earth and Environment, University of Leeds, Leeds UK

While directional variations in the geomagnetic field are now widely used in archaeological practice in France to date fired structures found in situ after their abandonment, such as ceramic kilns or domestic ovens, the dating method based on geomagnetic field intensity variations is still under development. The reference intensity variation curve in France remained very fragmentary until very recently, thus limiting the possible applications towards dating. However, over the past decade, the acquisition of a large number of new archeointensity data has considerably refined our knowledge of these fluctuations from the early Middle Ages to the present day (~1500 years). Large and rapid fluctuations have been revealed. In particular, the period of the early Middle Ages is framed by a rapid increase in intensity in the 6th century and a rapid decrease in the 10th century. These two time intervals therefore seem particularly favorable for the use of archeointensity for dating purposes. To illustrate this potential, we present the archeointensity study of two Medieval ceramic productions, from workshops located in Bourges (Cher) and in Chaudry (Oise).

In our laboratory, other archeointensity studies have focused on the Near East with a large set of new data acquired in Syria for the Bronze period, between c. 3000 and c. 1000 BC, allowing the construction of a regional average intensity variation curve. This curve also offers new chronological constraints, which will be illustrated by several examples of archaeological contexts.

Mots-Clés : Archeomagnetism, field intensity, dating method, chronology, ceramic production



Des sédiments calcaires pour fabriquer les plus anciennes céramiques du Levant Sud (seconde moitié du 7^{ème} millénaire avant notre ère) : un choix technique singulier ?

Carine Harivel^{*1}, Yvan Coquinot², Anna Eirikh-Rose³, Julien Vieugué⁴

¹PRETECH UMR 7055– Université Paris Nanterre - France

²C2RMF - France

³Israel Antiquities Authority - Israël

⁴CNRS - UMFRE 7 Centre de Recherche Français à Jérusalem – Israël

Au Levant Sud, les premières sociétés potières apparaissent durant la seconde moitié du 7^e millénaire av. n. è. (*Early Pottery Neolithic*). Plusieurs entités culturelles, définies à partir des styles décoratifs des céramiques, ont été distinguées pour les débuts du Néolithique céramique. Le Yarmoukien et le Lodien sont parmi les mieux documentées. Nous nous intéressons ici au Yarmoukien de la vallée du Jourdain. Les sites emblématiques de cette culture sont ceux de Munhata et de Sha'ar Hagolan situés au sud du lac de Tibérias, à environ 5 km l'un de l'autre. D'après notre étude des céramiques de ces deux sites, les pâtes sont généralement très calcaires ($35 < \text{CaCO}_3\% < 68$), pauvres en minéraux argileux (9% en masse d' Al_2O_3 en moyenne) et d'origine locale. L'environnement géologique des sites est très calcaire et les sources de matières argileuses disponibles localement varient en composition. Dès lors quelles ont été les sources exploitées pour la confection des céramiques yarmoukiennes, et les matériaux utilisés ont-ils des propriétés particulières ?

L'un des objectifs de notre recherche est d'identifier précisément les sources de matières premières exploitées par les premiers potiers du Levant Sud et de caractériser les propriétés de ces matériaux afin de comprendre les choix des potiers. Pour se faire, nous caractérisons le plus finement possible la composition des céramiques archéologiques à partir de techniques d'observation (stéréomicroscope, microscope optique, MEB) et d'analyses chimiques (PIXE). À partir de ces informations nous réalisons des prospections ciblées sur le terrain de manière à identifier les sources naturelles actuelles dont la composition se rapproche le plus de celles des objets archéologiques. Une fois trouvé des matériaux naturels analogues à ceux des potiers néolithiques, nous caractérisons leurs propriétés thermiques et mécaniques pour émettre des hypothèses sur les stratégies d'exploitation des sols à cette période charnière.

Mots-Clés : Premières céramiques; Levant Sud; provenance; matière première; pétrographie; propriétés des matériaux



Modélisation bayésienne Oxcal et ChronoModel de la datation de l'éruption des ponces d'Avellino (Vésuve) à l'âge du bronze.

Jean-Claude Lefèvre ^{1*}, Philippe Lanos ², Claude Albore Livadie³,

Philippe Dufresnes ², Christine Oberlin¹

¹CNRS, UMR ArAr, Univ Lyon, France

²CNRS, IRAMAT-CRPAA and Géosciences-Rennes, Univ. Bordeaux-Montaigne et Univ. Rennes 1, France

³CNRS, Centre Camille Jullian, Aix Marseille Univ., France

La multiplication des données chronologiques fournies par les différentes méthodes de datation absolue et celles obtenues par les fouilles et l'analyse des mobiliers soulèvent la question de leur traitement conjoint suivant des méthodes fiables et reproductibles. C'est pour répondre à cette question que depuis les années 90 des archéologues, des archéomètres et des statisticiens ont développé des logiciels de modélisation chronologique utilisant des statistiques dites bayésiennes. L'éruption plinienne dite d'Avellino, à l'âge du bronze, est un événement majeur de l'histoire volcanique du Vésuve. Ses dépôts ponceux sont un marqueur stratigraphique important sur de nombreux sites archéologiques régionaux. Cet événement est aussi synchrone de changements culturels de l'âge du bronze en Campanie. Afin de préciser la datation de l'éruption, nous avons traité l'ensemble des données chronologiques disponibles liées directement à l'éruption, mais aussi les informations chronologiques, stratigraphiques et culturelles apportées par les sites archéologiques en relation avec cette éruption. Afin de contraindre au mieux cette modélisation nous avons élargi le modèle aux phases archéologique antérieures et postérieures. Cette modélisation a été réalisée de façon aussi proche que possible par les logiciels de statistique bayésienne Oxcal et ChronoModel afin de comparer les résultats obtenus.

Mots-Clés : Datations, Avellino, Vésuve, Statistiques bayésiennes, Chronomodel, Oxcal, ¹⁴C



Exploiter les résultats d'analyses chimique des sols archéologiques à l'aide des statistiques spatiales

Arthur Laenger ^{*1}, Arnaud Martel ², Aline Durand ¹, Fabien Boucher ³

¹ Centre de Recherches en Archéologie, Archéosciences et Histoire (CReAAH) – CNRS: UMR 6566 – Le Mans Université - France

² Institut des Matériaux et des Molécules du Mans (IMMM) – CNRS: UMR 6283 – Le Mans Université - France
³ IUT de chimie – Le Mans Université - France

L'analyse chimique des sols archéologiques se développe depuis quelques années avec pour objectif de proposer une information supplémentaire pour l'interprétation des vestiges, via la détection d'un signal chimique lié aux activités anthropiques passées. L'emploi de la spectrométrie de fluorescence des rayons X présente l'avantage de mesurer la concentration de presque l'intégralité des éléments chimiques. De plus, de nombreux prélèvements sont effectués sur le terrain. L'archéomètre dispose alors de données en nombre suffisamment important pour permettre l'exploration à l'aide d'outils statistiques.

Les informations à représenter sont choisies en fonction de l'existence de variations notables des concentrations pour un élément chimique donné ainsi que sur le franchissement des seuils de détection et de quantification de l'appareil de mesure par lesdites concentrations. Il reste ensuite à distinguer les éléments représentatifs de l'activité anthropique de ceux strictement géologique. A l'heure actuelle, cette distinction s'effectue principalement par empirisme, d'après les données étudiées des sites précédents. L'utilisation de l'analyse en composante principale (ACP) pourrait bien palier à cette technique et fait l'objet d'expérimentation actuellement.

La représentation des répartitions de concentrations d'éléments chimiques s'effectue selon plusieurs modes. Le premier est une interpolation en pondération inverse à la distance, transformant l'information discrète en information continue. Cette méthode d'interpolation est particulièrement adaptée aux semis de points réguliers, correspondant aux prélèvements effectués sur les sites. Un second mode de représentation est le calcul de points chaud. Il crée une couche de données complémentaire de la première, rendant possible de repérer des anomalies locales lorsque l'interpolation crée des distributions de concentrations homogènes, peu interprétables pour l'archéologie.

Mots-Clés : Archéologie, analyse chimique, sol, XRF, statistique spatiale, SIG, ACP



La "Paléoshellomique" dans les starting-blocks

Jorune Sakalauskaite^{1,2,3}, Frédéric Marin^{2*}, Beatrice Demarchi³

¹ Palaeoproteomics Group, GLOBE Institute, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark

² Laboratoire Biogéosciences, UMR CNRS 6282, Université de Bourgogne - Franche-Comté, Dijon,

France ³ Dipartimento di Scienze della Vita e Biologia dei Sistemi, Università degli Studi di Torino, Torino, Italia

Pour construire leur coquille calcaire, les mollusques sécrètent un assemblage complexe de protéines, polysaccharides, lipides et pigments qui demeurent inclus dans la coquille une fois celle-ci formée. Ces constituants macromoléculaires - qualifiés collectivement de matrice coquillière calcifiante - font partie intégrante de la coquille, même s'ils n'en représentent qu'une petite fraction, de l'ordre de 1%, voire moins. Ayant un fort potentiel de préservation au cours des temps, ces macromolécules participent à l'évolution diagénétique des coquilles et constituent une source d'information inestimable, lorsqu'extraites de spécimens anciens.

Depuis les années 50, la recherche de protéines coquillières fossiles a donné lieu à un nombre important d'études jalonnant la mise en place d'un champ disciplinaire, la paléobiochimie, qui a connu son âge d'or entre les années 70 et 90, marquant le pas depuis. Les raisons de ce relatif déclin tiennent à plusieurs obstacles: 1. Contrairement à l'ADN, il n'existe pas de moyen de dupliquer / amplifier un signal protéique, nécessairement faible dans du matériel fossile; 2. Le patron de dégradation d'une protéine en milieu minéralisé est certes connu dans ses grandes lignes (hydrolyse des liaisons peptidiques, désamination, décarboxylation, racémisation, recombinaison avec des sucres, etc...) mais n'en demeure pas moins un processus complexe et multi-paramétré dépendant de la présence d'eau liée, de la température, de la pression, de la position de la protéine au sein de la structure biominéralisée, et enfin, de ses propriétés biochimiques; 3. En dernier lieu, la méconnaissance complète des matrices coquillières de mollusques actuels a prévalu pendant plusieurs décennies, interdisant des comparaisons avec leurs équivalents fossiles.

Les données protéomiques acquises ces dernières années sur des matrices coquillières (le "shellome") actuelles et fossiles pallient en grande partie les béances mentionnées au point 3. Elles permettent un réexamen complet des processus diagénétiques qui affectent les matrices calcifiantes. Elles constituent de plus un outil de réinterprétation de restes coquilliers trouvés dans des sites archéologiques. Quelques exemples traités ici montreront toute la puissance de la "paléoshellomique", une discipline émergente amenée à se développer à l'interface de la sédimentologie, des sciences de l'Evolution et de l'archéologie.

Mots-Clés : biominéralisation, coquille, mollusque, matrice calcifiante, fossile, protéomique, diagénèse



Ag isotope analysis of galenas from Spain: new insights into silver ore exploitation in Roman times

Jean Milot ^{*1}, Janne Blichert-Toft ¹, Chloé Malod-Dognin ¹, Philippe Télouk ¹,
Mariano Ayarzagüena ², and Francis Albarède ¹,

¹ Ecole Normale Supérieure de Lyon – CNRS – Université de Lyon – France

² University of Castilla-La Mancha – Spain

Silver played a major role in past societies, first as a luxury commodity, then as metal for coinminting. Silver-bearing galena (PbS) is commonly thought to have been a major source of silver in the Antiquity. Galena was first smelted under reducing conditions to obtain lead bullion which was then used to extract silver by cupellation. Since Phoenician until Roman times, the Iberian Peninsula was intensively exploited for its silver resources [e.g. 1]. Here, we explore the dynamics of silver exploitation in Spain during Roman times using Ag isotopes [2].

We measured the Ag isotope composition of 47 galena samples from several Spanish mining districts previously shown to have been exploited in ancient times. After a two-step purification by ion-exchange chromatography, Ag isotope compositions were measured by multi-collection inductively coupled plasma mass spectrometry (MC-ICP-MS) at ENS Lyon using added Pd to correct for instrumental mass bias. The Ag isotopic compositions of the different Spanish ores were then compared to those of Roman silver coins to identify potential provenance links.

The Ag isotope compositions of silver coins and galenas combined with Ag-Pb isotope correlations exclude most known galena deposits as significant sources of Roman silver. Instead, they suggest that galena was mined mainly for lead, which was used to extract silver from other Pb-depleted ores in only a few specific mining districts. This interpretation is in accordance with the example of Phoenician and Roman silver smelting in Rio-Tinto (Huelva province, SW Spain), where lead was imported from other regions to extract silver from local Ag-rich jarosite [3]. This study constitutes the starting point for the establishment of an extensive database of Ag isotope compositions of ores for future studies of precious metal tracing.

[1] Domergue, C., 2008. Les mines antiques. La production des métaux aux époques grecque et romaine, Paris, A. et J. Picard, 240 p.

[2] Desaulty, A.-M., Télouk, P., Albalat, E., Albarède, F., 2011. Isotopic Ag-Cu-Pb record of silver circulation through 16th–18th century Spain, PNAS, 108(2), 9002–7.

[3] Anguilano, L., Rehren, T., Müller, W., Rothenberg, B., 2010. The importance of lead in the silver production at Riotinto (Spain), ArchéoSciences, 34, 269–276.

Key words: Provenancing, Ag isotopes, galena, silver coins, Antiquity



Vases en pierre médiévaux fabriqués de Meta-Cumulats dans le nord de Madagascar

Christoph Nitsche¹, Sylvain Velomora⁴, Chantal Radimilahy², Guido Schreurs³, Vincent Serneels¹

¹ Department of Geosciences, University of Fribourg, Switzerland

² University of Antananarivo, Madagascar

³ Institute of Geological Sciences, University of Bern, Switzerland

⁴ University of Toliara, Madagascar

Dans le nord de Madagascar, la production, la consommation et le commerce de récipients en pierre tendre fabriqués au tour par la population médiévale dite Rasikajy sont des éléments clés du patrimoine archéologique. Les récipients finis étaient exportés et ont été trouvés aux Comores et le long de la côte d'Afrique de l'Est, attestant d'une participation active au réseau commercial du sud de l'océan Indien.

Ces récipients tripodes finement décorés ont été fabriqués à partir de pierres tendres siliciques vert foncé à gris qui se trouvent dans une suite magmatique néoproterozoïque dans l'arrière-pays cristallin. Jusqu'à présent, nous avons identifié, visité et échantillonné plus de 30 carrières dans cette région. La roche extraite, une lithologie exotique riche en amphibole-chlorite connue sous le nom de Hoesbachite, s'est formée par un métasomatisme complexe en plusieurs étapes d'un protolithe ultramafique. Ce métamorphisme riche en fluides a entraîné une importante variation minéralogique et de composition à l'échelle de l'affleurement, mais les mineurs Rasikajy étaient déjà au courant de cette variation : les roches contenant du talc sont légèrement plus tendres et étaient préférées pour la production de récipients. Comme les deux types sont indiscernables à l'œil nu, de nombreux blocs dans les carrières portent des marques de ciseau qui visaient à tester la qualité, et les spécimens riches en serpentine étaient systématiquement rejetés.

Cet article vise à donner un résumé des résultats de nos études pétrographiques et typologiques en cours, tant en ce qui concerne les avancées dans la compréhension de l'histoire de la région que les implications pour les études de provenance des pierres tendres siliciques en général.

Mots-Clés : Madagascar, Pierre Tendre, Océan Indien, Provenance



Reconstitution de provenance de coquilles d’huîtres archéologiques à partir de l’étude de la composition chimique élémentaire et isotopique

Pesnin Marie¹, Mouchi Vincent², Forest Vianney³, Dupont Catherine⁴, Emmanuel Laurent^{*1}

¹ Sorbonne Université – CNRS-INSU, UMR 7193, IStEP, F-75005 Paris, France.

² Sorbonne Université – CNRS, URM 7144, Station Biologique de Roscoff, F-29680 Roscoff, France.

³ INRAP-Midi-Méditerranée, UMR 5068, TRACES, F- F 31058 Toulouse, France

⁴ CNRS, CReAAH, UMR 6566, Université de Rennes, F-35042 Rennes, France

Les coquilles d’huîtres archéologiques font partie des restes malacologiques issus de la consommation alimentaire les plus fréquemment retrouvés sur les sites depuis l’Antiquité. La caractérisation de la provenance de ces coquilles est rendue difficile par l’éloignement géographique du littoral d’un grand nombre de ces sites. Une solution potentielle se base sur le fait que les coquilles de mollusques sont capables d’enregistrer les paramètres physicochimiques du milieu comme la température, la salinité et la composition chimique de l’eau de mer. Cette dernière peut être partiellement conditionnée par les apports des bassins versants bordant la zone de vie des huîtres. Notre étude propose, à partir de plusieurs approches géochimiques complémentaires, de caractériser le milieu de vie de deux groupes d’huîtres médiévaux français (un de la façade atlantique et l’autre du littoral méditerranéen) et d’identifier une méthode capable de déterminer leur origine géographique.

A partir d’une série de mesures effectuées sur le crochet des coquilles par LA-ICP-MS, nous avons mis au point une comparaison systématique des concentrations en plusieurs éléments chimiques entre les groupes. Les différentes méthodes statistiques multivariées des données ont permis de mettre en évidence les éléments discriminants pour retrouver la provenance des individus. Cette approche novatrice a été couplée à une méthode géochimique plus classique permettant d’analyser la composition isotopique en oxygène et en carbone. Ces analyses permettent de définir les conditions environnementales du milieu de vie et apportent des informations complémentaires sur l’évolution climatique de l’Holocène.

Les méthodes d’analyses géochimiques en Sciences de la Terre, telles que celles présentées ici, pourraient trouver des applications en Archéologie en permettant notamment de caractériser l’exploitation des ressources aquatiques et de reconstruire l’histoire commerciale et culturelle des territoires à tous les âges.

Mots clé : Coquilles d’huîtres – Géochimie - Éléments traces – Isotopes stables –Provenance – Conditions environnementales – Climats.



Héritages morphologiques vus par LiDAR aéroporté de l'Artillerie Lourde sur Voie Ferrée : exemple de la Montagne de Reims

Robin Perarnau ^{*1}, Alain Devos ¹, Amélie Quiquerez ²

¹ Groupe d'Etude sur les Géomatériaux et Environnements Naturels Anthropiques et Archéologiques (GEGENAA) - EA 3795, Université de Reims Champagne-Ardenne – France

² Archéologie, Terre, Histoire et Sociétés (ARTEHIS) – CNRS : UMR6298, Université de Bourgogne-Franche-Comté – France

Sur la Montagne de Reims (Marne – 51), une campagne LiDAR aéroporté mené à l'hiver 2018a permis de révéler les traces d'un important réseau d'Artillerie Lourde sur Voie Ferrée (ALVF), utilisé entre 1916 et 1918 dans l'objectif de préparer l'offensive du Chemin des Dames et de renforcer les positions françaises de la ville de Reims.

Ces traces sont aujourd'hui particulièrement difficiles à distinguer des cheminements récents ou passés utilisés par l'homme ou par les animaux dans le massif forestier de la Montagne de Reims, bien qu'elles soient relativement bien préservés en raison de leur position à plus de 18 km du front. L'analyse historique et archivistique à partir de documents textuels, de plans et de photographies aériennes anciennes a permis de mieux évaluer l'étendue de ce réseau et de comprendre les différentes étapes de sa construction. L'utilisation d'un système d'information géographique et de données issues d'une campagne LiDAR aéroporté a permis de mettre en valeur ces vestiges de guerre de manière inédite. Une analyse de la rugosité à partir du modèle numérique de terrain a révélé des différences de morphogénéité particulièrement importantes, montrant une lisibilité morphologique dépendant de la nature géologique et géomorphologique des terrains. La comparaison avec d'autres sites à partir de documents d'archives montre l'impact post-occupation des pratiques agricoles et sylvicoles sur ce type de vestiges.

Ces résultats sont le fruit d'un partenariat inédit entre l'Université de Reims Champagne-Ardenne, l'Office National des Forêts et le Parc Naturel Régional de la Montagne de Reims.

Mots-Clés : ALVF, Grande Guerre, LiDAR, Montagne de Reims



Iron archaeometallurgy : slag inclusion and hammerscale

Jean Rodier ^{*1}, Vincent Serneels¹

¹ Département des Géosciences, Université de Fribourg, Suisse

Several chemical studies have highlighted the existence of a link between the compositions of the iron ores and those of the products/waste at the different steps of the production line. This study focuses on the potential information from hammerscale. This waste is produced during hammering on the anvil of hot iron. It is mainly composed of iron oxide and a silicate component.

During smelting of iron ore by the bloomery process a metallic bloom and a liquid waste, the slag, are produced. The non-reduced compounds from the system concentrate in the slag. The raw iron product always contains some inclusions of entrapped smelting slag. During hotforging the amount of smelting slag inclusions gradually decreases. The smithing slag, a plano-convex piece of slag forms at the bottom of the hearth by accumulation of various materials, including some remelted smelting slag inclusions. However, the contribution of slag inclusion from the processed iron is very small and altered by massive contamination (sand, ashes, ect). Moreover, one smithing slag can be the result of the processing of several different pieces of iron with different chemical signatures. On the contrary, one single particle of hammerscale is formed out of one single piece of iron.

Our ongoing research aims to investigate the potential chemical information extracted from hammerscale, mainly by in-situ chemical analysis with SEM-EDS. Preliminary results have been obtained from hammerscale produced during the hot forging of bloomery iron by Dogon smiths in Mali (Soulignac 2017). The non-reduced compounds in the hammerscale show significant contamination for the major elements resulting in variable ratios. On the other hand, specific minor and trace elements (V, Mn, Cr, Ti, Zr) show more consistent behavior. Within an archaeological assemblage of hammerscale, the study of these specific ratios, less sensitive to contamination, could be useful to evidence the chemical variability of the metals worked.

Key-words: Geochemistry, Archaeometallurgy, Slag inclusion, hammerscale



L'abbatiale Ste Foy de Conques (Aveyron, France) : de l'édifice à son environnement, une approche intégrée

Renaud Toullec ^{*1}, Jean-David Vernhes ², Olivier Bain ², Pierre Saulet ², Louis Causse ³

¹ UniLasalle-Département Géosciences (GEOS) – Equipe B2R : Bassins, réservoirs, ressources – U2R 7511.
19 rue Pierre Waguet- BP 30313 - F-60026 BEAUVAIS Cedex – France

² UniLasalle-Département Géosciences (GEOS) – 19 rue Pierre Waguet- BP 30313 - F-60026 BEAUVAIS Cedex – France

³ Architecte Honoraire des Bâtiments de France (Aveyron), 2 bis impasse Cambon, 12000 Rodez- France

L'abbatiale Sainte Foy de Conques est considérée comme l'un des joyaux de l'art roman occidental. Classée aux monuments historiques en 1840 puis au patrimoine mondial de l' UNESCO en 1998 au titre des chemins de Saint-Jacques-de-Compostelle, l'essentiel des études a porté sur son architecture, sa place dans l'histoire de l'art et des mentalités au Moyen Âge. Une première synthèse pétrographique de l'édifice a été réalisée à l'occasion du 167^e congrès archéologique (2009). Une approche géologique rigoureuse des classes de roches composant l'édifice, ainsi que des sources et zones d'approvisionnement probables restait nécessaire. D'un point de vue pétrographique, la bâtisse est composée de trois grands types de roches, reflet de la diversité des affleurements de cette portion de Massif Central, à l'Est du Sillon Houiller et appartenant pour l'essentiel au para-autochtone rouergat : *i*) les grès permians rouges (appelés « rougier » localement), parfois tachetés d'oxydes de fer et les grès blancs *ii*) les calcaires liasiques, essentiellement hettangiens, dont le « Rousset » aux teintes jaunes caractéristiques et *iii*) les schistes issus du socle paléozoïque, ubiquistes à Conques et sa région septentrionale. Avec des volumes beaucoup plus limités, du granite porphyrique et des serpentinites ont été décrites dans l'ensemble abbatial. Le calepinage systématique a été réalisé à hauteur d'homme autour de l'abbatiale et à l'aide de moyens indirects sur les parties inaccessibles, par l'intermédiaire d'un drone. Une première tentative d'analyse semi-automatique des faciès a été réalisée à l'aide de mosaïques de photos RVB de très haute résolution et replacées sur un modèle photogramétrique de l'ensemble du bâtiment. Outre l'analyse pétrographique *in situ*, des études de terrain, complétées par des analyses de lames minces ont été réalisées dans les zones susceptibles d'avoir pu servir de source pour les matériaux de construction. Même si les carrières du Haut et Bas Moyen Âge ont disparu ou sont désormais difficilement visibles dans le paysage, les sources historiques (notamment la légende de Ste Foy de Conques, XI^e siècle) et les contraintes topographiques ont pu aider à préciser les possibilités de sources d'approvisionnement. Aussi, les environs de Lunel, à moins de 10 km à l'Est de Conques, dans lesquels des calcaires de type « grainstone oolithique » retrouvés *in situ* et sur l'édifice, attestent d'une origine très locale. Malgré la présence généralisée de calcaires dans les Causses de Rodez plus au sud, ceux-ci ne semblent pas avoir été privilégiés. Les grès blancs, formant l'entièreté de la tour lanterne et de quelques pierres de parterment au niveau du chevet sont caractéristiques de la bordure nord du bassin permien. La localisation des grès rouges, réputés des environs de Combret, reste difficile à établir. Les schistes, dont l'origine locale est certaine, ne présentent pas les caractéristiques pétrographiques justifiant une répartition en deux catégories comme proposé par le Congrès Archéologique (2009).

Mots-Clés : calepinage, abbatiale, Conques, Aveyron, rousset, rougier, photogramétrie, drone, pétrographie



A non-invasive investigation for quarry provenance of Delos archaeological marbles

Tommy Vettor ^{*1}, Violaine Sautter ¹, Sylvain Pont ¹, Carine Harivel ², Laurent Jolivet ³,
Isabelle Moretti ³, Jean-Charles Moretti ⁴

¹ IMPMC, Muséum National d'Histoire Naturelle - France

² PréTech, Université Paris Nanterre - France

³ ISTEP, Sorbonne Université - France

⁴ Institut de Recherche sur l'Architecture Antique (IRAA), CNRS, MOM, Université Lumière Lyon 2 – France

Delos Island, one of the smallest islands of Cyclades archipelago in Greece, is known for its exceptionally well-preserved archaeological site. The island is mostly composed of granite and gneiss, with only few marble inclusions but the ancient Delian architecture is first and foremost made of marble and gneiss. Even if the local marble has been used, despite its often mediocre characteristics, a large part of the marbles has been imported from the neighbouring islands and continental Greece. For now, the origin of these marbles remains mostly unknown. Several analytical methods have been developed in archaeometry for years to determine the origin of marbles, but they are generally destructive. Due to the frequent difficulties linked to sampling authorizations, we have prioritized and tested a non invasive approach. It is based on calcite grain size analyses (Maximum Grain Size – MGS) and on a hand-held portable X-ray fluorescence (pXRF) analyser to detect major and trace elements used so far in archaeometry, for example for obsidian or ceramic provenance. We combined the use of pXRF instrument and MGS with cluster analyses based on statistical data processing, the so-called Principal Component Analysis (PCA). Despite a number of limitations induced by XRF miniaturization, pXRF appears to be a powerful tool for preliminary provenance studies when conventional micro destructive analyses are precluded. Moreover, the XRF portability allows to multiply in-situ measurements, permitting a more statistic analysis sampling. By the application of this protocol, we thus managed to verify several provenances suggested by macroscopic observations, or to refute provenances suggested by archaeologists a century ago.

Mots-Clés : Archaeometry, marble provenance, Delos, pXRF spectrometry, Antiquity period



Diversité des pierres mises en œuvre dans les sites archéologiques grecs de l'est du Golfe de Corinthe : nature, provenance, utilisation

Marilou de Vals ^{1*}, ², Isabelle Moretti ¹

¹ ISTEP – Sorbonne Université – France

² Contrat doctoral de l'École Française d'Athènes - Grèce

Le Golfe de Corinthe est un rift essentiellement quaternaire, fermé à l'est depuis environ 350.000 ans par la surrection de la zone de Corinthe-Mégara. Il est bordé de reliefs relativement abrupts, au nord par les nappes des Hellénides, et au sud du fait de la surrection du Péloponnèse depuis 1 Ma. C'était donc, du temps où les transports marins étaient prédominants pour les charges lourdes, une zone relativement isolée avec des échanges possibles par mer entre les côtes du Golfe. Le but de cette étude est, à plus grande échelle, de comprendre la logique régionale de l'utilisation de la pierre en Grèce antique. Pour cela, il a été documenté : la variété des faciès mis en œuvre (nombre, volume), leur identification, et leur provenance, pour un ensemble de 12 sites archéologiques du VII^e au II^e siècles avant J.-C.

L'analyse de Delphes a montré une utilisation importante des calcaires mésozoïques, non observée dans les sites étudiés à l'est et au sud du Golfe ; la zone comprend les sanctuaires (Néméa, Isthmia, Perachora), les cités-états (Ancienne Corinthe, Sycione), les villes (Phénéos, Stymphale). Les carrières antiques connues dans cette zone sont localisées dans les sédiments synrift. L'étude de cet ensemble varié permet d'obtenir une vision globale des matériaux de prédilection des Anciens Grecs, à mettre en parallèle avec le contexte géologique de la marge sud du Golfe - pré-rift (carbonates mésozoïques) et synrift (dépôts deltaïques conglomératiques à plus fins, shore-face, terrasses marines, travertins). Les conglomérats sont les matériaux que l'on retrouve le plus fréquemment dans les sites. Les faciès du synrift avec leur forte porosité et leur faible masse volumique sont les pierres qui semblent les plus recherchées, au sens celles que l'on va chercher le plus loin. Au contraire, en dehors de Delphes, les roches dures du pré-rift (calcaires type *mudstone*) sont très rarement employées, même si elles sont présentes à proximité immédiate du site.

Mots-Clés : archéologie, Grèce, Golfe de Corinthe, matériaux de construction



Le rempart gaulois de l'oppidum de Châteaumeillant (Cher, France) : approche géotechnique et micromorphologique de la construction

Carole Vissac ¹, Amélie Laurent ^{2,4}, Mélanie Fondrillon ^{3,4}, Sophie Krausz ⁵

¹ GéoArchEon – France

² Service d'archéologie préventive du Loiret – France

³ Service d'archéologie préventive de Bourges Plus

⁴ UMR 7324 CITERES

⁵ Université Bordeaux-Montaigne-Ausonius UMR5607 – France

Les fouilles menées à Châteaumeillant ont révélé une importante fortification de l'âge du Fer qui montre, sur 10 m de haut, un premier ouvrage (*mur gallicus*) recouvert d'un rempart massif bordé d'un fossé de 40 m de large. Pour aider à la compréhension de son architecture globale, son mode de construction, la mise en oeuvre des matériaux utilisés (assemblage induré d'argile et/ou de roche métamorphique), des analyses géotechniques et micromorphologiques ont été effectuées sur les différentes entités du rempart (plateforme, noyau central, blindage avant, rampe arrière).

Sur une coupe transversale du rempart, des prélèvements micromorphologiques ont eu pour but de préciser la nature de certaines couches, le degré de transformation et leur mode de mise en place. La prospection géotechnique au pénétromètre léger (Panda®) visait quant elle à mesurer la compacité des parties du rempart et si possible les différencier.

L'étude micromorphologique a mis en évidence deux types de matériaux qui n'ont quasiment pas été mélangés. Les premiers proviennent notamment d'horizons de sol enrichi en argile. Les seconds à composante amphibolitique montrent une hétérogénéité variable liée à leur assemblage, au faciès et au degré de remaniement du matériau source (roches dures, profil d'altération). Ils proviendraient d'un gisement plus éloigné. Des apports massifs ou successivement tassés, des degrés d'humidité distincts, un calibrage ont pu être observés. Les propriétés mécaniques n'ont pas montré d'ensemble uniforme. La compacité du blindage est apparue proche de celle du noyau et de la plateforme (globalement comprise entre 3MPa et 16MPa). La prise en compte du degré d'hétérogénéité interne a permis toutefois de distinguer le blindage du noyau et de la plateforme.

L'apport de ces analyses contribue à la fois à montrer une connaissance élaborée des constructeurs pour choisir, assembler des géomatériaux et à enrichir le potentiel de caractérisation des dépôts anthropiques.

Mots-Clés : âge du Fer, archéologie, construction en terre, géomatériaux, micromorphologie, pénétromètre

* Intervenant



T6.3. Géarchéologie



Vers une économie de marché colonial ? Pratiques de l'habitat des Nunatsiavumiut à la fin du Petit Âge glaciaire

Barbel, Héloïse^{*1,2,3,4,5}, Woollett, James^{1,2,3}, Todisco, Dominique^{1,6}

¹ Centre d'études nordiques, Université Laval, Canada

² Département des sciences historiques, Université Laval, Canada

³ Groupe de Recherche en Archéométrie, Université Laval, Canada

⁴ Chaire de recherche Sentinelle Nord sur les relations avec les sociétés inuit, Université Laval, Canada

⁵ Smallwood Foundation, Memorial University of Newfoundland, Canada

⁶ UMR IDEES 6266, Département de Géographie, Université de Rouen, France

D'après les archives, suite à l'établissement des missionnaires moraves, les Inuit du Nunatsiavut (Labrador, Canada) se seraient tourné.e.s au 19^e s. vers la production de surplus de gras de phoque, de morue et de fourrures vendus à la mission littorale de Nain. L'influence missionnaire aurait engendré la sédentarisation de certaines maisonnées inuit à proximité de Nain. Ces changements dans les pratiques de l'habitat impliquaient de nouvelles dynamiques de mobilité saisonnière entre les îles et le littoral, qui pourraient avoir été influencées par des transformations dans les paysages maritimes à la fin du Petit Âge glaciaire.

Ce projet interroge le paysage d'activité des personnes qui ont occupé l'habitation 4 du site South Aulatsivik 6 (île de South Aulatsivik, Nain), et des relations qu'elles entretenaient avec la mission de Nain. D'après les analyses préliminaires des vestiges fauniques, architecturaux et archéologiques retrouvés dans l'habitation et son dépotoir, la structure aurait été habitée saisonnièrement à la fin du 19^e s. par des personnes ayant adopté une implication opportuniste dans l'économie coloniale, tout en maintenant une diversité dans les pratiques de chasse terrestres et marines. Le contexte stratigraphique du site souligne le défi taphonomique d'appréhender la temporalité des processus de remobilisation et d'enfouissement (fonte de la neige, charognage, dynamique du couvert végétal) des vestiges associés aux différentes occupations afin de permettre d'interpréter les contextes stratigraphiques excavés en termes de chronologie de mise en place des dépôts et de saisonnalité d'occupation de l'habitation. Les analyses typologiques permettent de questionner la datation des unités. Les analyses micromorphologiques, zooarchéologiques, macrofossiles, et l'étude taphonomique de dépotoirs expérimentaux contribueront à une meilleure compréhension et interprétation des palimpsestes produits par les occupations répétées sur une courte période temporelle.

Mots-Clés : Archéologie de l'habitat ; taphonomie ; géoarchéologie ; zooarchéologie ; typologie ; Nunatsiavut ; économie missionnaire.



Le réseau hydraulique de la cité pré-Inca de Tiwanaku (Bolivie) : mise en relation de la morphologie des canaux avec le contexte hydrogéologique et paléoenvironnemental

Marc-Antoine Vella ¹, Grégory Bièvre ², Christophe Delaere ³, Julien Thiesson ¹,
Roger Guérin ¹, Carlos Heredia ^{2,4}, Stéphane Guédron ^{2,4}

¹ UMR 7619 METIS, Sorbonne University, CNRS, EPHE, 75005, Paris, France

² Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, ISTerre, 38000 Grenoble, France

³ Oxford Centre for Maritime Archaeology (OCMA), University of Oxford, OX1 2PG, United Kingdom

⁴ Laboratorio de Hidroquímica - Instituto de Investigaciones Químicas - Universidad Mayor de San Andres, Campus Universitario de Cota Cota, casilla 3161, La Paz, Bolivia

La cité de Tiwanaku est l'un des plus grands centres urbains préhispaniques des Andes. Comme le climat est extrême dans l'Altiplano de haute altitude, la gestion de l'eau était centrale pour le développement des anciennes civilisations. Jusqu'à présent, les connaissances concernant l'existence d'un réseau d'eau autour de la ville de Tiwanaku se limitent à des observations de surface et aériennes. Nous avons utilisé des techniques géoscientifiques (morphologie à haute-résolution, géophysique et chronostratigraphie) pour reconstruire la morphologie des canaux, leur dynamique d'écoulement ainsi que leur chronologie de fonctionnement et nous les replaçons dans leur contexte paléoclimatique. Nos résultats confirment la présence de ce réseau de canaux et permettent de cartographier ses principales composantes hydrologiques. Deux canaux d'environ 30 mètres de large contournant le noyau monumental et alimentés par une nappe phréatique peu profonde et de multiples affluents ont été trouvés reliant les zones agricoles et urbaines. Notre reconstitution historique démontre que les canaux ont été mis en place dans la période initiale de la fin de la formation (c'est-à-dire de 200 avant J.-C. à 200 après J.-C.) pendant une période sèche susceptible de répondre aux besoins de gestion des ressources en eau. Pendant l'état de Tiwanaku (c'est-à-dire avant 800 après J.-C.), le remplissage des canaux témoigne d'un changement majeur dans leur utilisation, et éventuellement de leur abandon partiel, lors d'une restructuration majeure du site, dans une période de précipitations régionales accrues.

Mots-Clés : civilisation tiwanaku, canaux, morphologie à haute-résolution, géophysique, paléo-environnements, géo-archéologie



Géohistoire de la forêt d'Écouves (Orne, Normandie), évolution diachronique, usages et paysages passés

Nicolas Blanchard ^{*1}, Damase Mouralis ², Dominique Todisco ³

¹ Doctorant en Géographie – UMR CNRS 6266 IDEES-ROUEN

² Professeur de géographie – UMR CNRS 6266 IDEES-ROUEN

³ Maître de conférences en géographie – UMR CNRS 6266 IDEES-ROUEN

L'acquisition d'images Lidar sur la forêt domaniale d'Écouves (Orne, Normandie) a permis d'ouvrir de nouvelles voies pour la compréhension de la géohistoire de cet espace forestier. Mentionnée pour la première fois au cours du XII^e siècle, la forêt d'Écouves est pressentie comme étant un espace forestier ancien (Houzard G., 1980). Les images Lidar semblent d'ailleurs confirmer sa singularité dans le corpus de forêts jusqu'alors étudiées dans le nord de la France (Georges-Leroy et al., 2007).

Contrairement aux forêts de la vallée de la Seine, seuls quelques parcellaires agricoles ont été découverts sous le couvert forestier actuel. Les structures archéologiques observées témoignent avant tout de l'exploitation d'un paysage forestier plus que d'un ancien terroir agricole colonisé par la forêt. Ainsi, près de 9500 plateformes de charbonnages ont été inventoriées, proposant un ensemble conséquent rarement observé.

L'analyse des faits archéologiques, a donné lieu à un croisement entre les images Lidar et les archives forestières (recueils de plans, documents d'aménagements des XVII^e-XVIII^e siècle). Ce parallèle a montré une corrélation entre la localisation des plateformes de charbonnage et les aménagements passés. Située dans un ancien bassin sidérurgique pré-industriel, l'exploitation de la forêt a pendant longtemps alimenté les forges locales dont la consommation en charbon imposait un aménagement en taillis.

Cette communication axera son propos sur l'interprétation et l'analyse Lidar comme les premiers résultats permettant d'envisager le paysage forestier passé.

Bibliographie :

Georges-Leroy M. et al., le massif forestier, objet pertinent pour la recherche archéologique. L'exemple du massif forestier de Haye (Meurthe et Moselle), *Revue Géographique de l'Est* [en ligne], vol. 49/ 2-3 | 2009, mis en ligne le 01 avril 2013 ; consulté le 10 Juillet 2020. URL : <http://journals.openedition.org/rge/1931>

Houzard G., Les massifs forestiers d'Andaines et d'Écouves, S.H.A.O, 2008

Mots-Clés : Géohistoire, Forêt, Archéologie, Anthropisation, Lidar



Approches de l'évolution et de l'anthropisation des paysages autour du site de Wakarida (Tigray Oriental, Éthiopie) depuis 8500 ans par la géoarchéologie, la chronostratigraphie et les archives historiques

Ninon Blond* ¹, Nicolas Jacob-Rousseau ¹, Yann Callot ¹

¹ : Laboratoire Archéorient (UMR 5133) – Université Lumière Lyon 2 - France

Wakarida se situe dans le Tigray Oriental (Éthiopie). Des vestiges d'occupations pré-/proto- axoumites et axoumites (I^{er} mill. av. n. è. – I^{er} mill. de n. è.) ont été découverts dans cette région. Cet espace est aujourd'hui constitué de vallées encaissées dont les fonds, comblés de sédiments, sont cultivés à l'aide de terrasses perpendiculaires au sens des écoulements. La présence conjointe de ces aménagements et de vestiges anciens soulève plusieurs questions quant aux évolutions des paysages et environnements de cette région durant l'Holocène. Cette communication, issue d'un travail de thèse et de nouvelles données, vise à comprendre dans quels paysages les populations se sont installées, comment elles les ont transformés et quelles ont été les conséquences de ces transformations sur l'environnement et les paysages. Il s'agira aussi de s'interroger sur les traces sédimentaires qu'elles ont laissées et sur la part d'actions anthropiques et de processus biophysiques dans ces modifications. Pour cela, cette étude est fondée sur la combinaison d'approches de géoarchéologie, chronostratigraphie et archives historiques. Ces méthodes ont permis de mettre en lumière trois phases principales, durant lesquelles l'influence humaine paraît de plus en plus nettement. Du VII^e au IV^e mill. av. n. è., les archives sédimentaires indiquent des processus majoritairement biophysiques dans une ambiance climatique plus humide, représentative des conditions de l'*African Humid Period*. Du III^e mill. au I^{er} siècle av. n. è., les dépôts montrent une transition à la fois vers des conditions plus sèches, mais aussi vers des processus biophysiques perturbés par les humains, transition cohérente avec l'apparition des vestiges archéologiques. Enfin, du I^{er} au XVII^e siècles de n. è., on observe l'apparition, dans les sédiments, de marqueurs de l'action anthropique, qui correspondent à l'empreinte des sociétés (déboisement notamment) documentée par les archives textuelles et iconographiques.



Mots-Clés : Éthiopie ; Tigray ; géoarchéologie ; archives sédimentaires ; archives historiques ; chronostratigraphie ; géomorphologie ; Holocène ; terrasses





Coévolution du système géomorphologique et du paysage de Mercurey (Bourgogne, France) : hypothèse d'une stratégie précoce de gestion de la ressource en sol

Brian Chaize ^{*1}, Aurélien Christol ¹, Mathieu Fressard ², Étienne Cossart ¹

¹ UMR CNRS 5600 EVS – Environnement Ville Société, Université Jean Moulin Lyon 3 – France

² UMR CNRS 5600 EVS – Environnement Ville Société, Université Lumière Lyon 2 – France

Même si la Côte de Bourgogne est l'un des vignobles les plus réputés au monde - ses « Climats » ont été inscrits sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO en 2015 - elle reste peu documentée sur le plan paléoenvironnemental. Emblématique de ce secteur, le terroir de Mercurey (Saône-et-Loire) constitue le cadre de ce travail. Positionné au sein d'un bassin versant, sa configuration structurale favorise les enregistrements sédimentaires. Notre recherche vise à comprendre la relation entre les modes d'occupation du sol, les pratiques agricoles et les dynamiques géomorphologiques au cours de l'Holocène récent. Elle permet ainsi de discuter la synchronie entre la mise en culture des territoires et l'augmentation du signal érosif.

L'approche privilégiée s'appuie sur les informations issues d'archives sédimentaires distribuées le long d'un continuum versant/fond de vallée. Le signal géomorphologique reconstitué est interprété à la lumière de données anthracologiques. En plus de renseigner l'évolution de la végétation ligneuse, les charbons constituent un marqueur privilégié des activités anthropiques depuis la fin du Néolithique.

Les résultats montrent, d'une part, une alternance de processus de fluage et de ruissellement dans la mise en place des dépôts et, d'autre part, une relation non linéaire entre les phases détritiques grossières et l'anthropisation du territoire. L'âge du Bronze est dominé globalement par une phase de faible emprise humaine sur le milieu. Il se caractérise par le transport de matériaux colluviaux grossiers jusqu'au fond de vallée en raison de l'instabilité structurelle du versant (Bronze ancien et moyen) et de facteurs de contrôle climatiques (Bronze final). À la période fini-médiévale et moderne, l'extension de la viticulture sur le versant coïncide avec une atténuation des dynamiques sédimentaires enregistrées en fond de vallée. Cela révèle une déconnexion géomorphologique entre le versant et le fond de vallée par des infrastructures agricoles.

Mots-clés : charbon, géomorphologie, paysage, Holocène, Bourgogne



La gestion de l'eau dans l'Antiquité romaine (I^{er} – VI^e s. AD) mise en évidence par l'analyse PIXE de carbonates archéologiques : l'exemple du site de Jebel Oust, Tunisie

Julien Curie ^{*1}, Christophe Petit ², Quentin Lemasson ³, Aïcha Ben
Abed ⁴, John Scheid ⁵, Henri Broise ⁶, Laurent Pichon ³

¹ Laboratoire d'Archéologies et Sciences de l'Antiquité (ArScAn) – CNRS : UMR7041 | LabEx RESMED
« Religions et Sociétés dans le Monde Méditerranéen », Sorbonne Université – France

² Laboratoire d'Archéologies et Sciences de l'Antiquité (ArScAn) – CNRS : UMR7041, Université Paris 1
Panthéon-Sorbonne – France

³ Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF) – France

⁴ Institut National du patrimoine – Tunisie

⁵ Collège de France – France

⁶ Institut de Recherche sur l'Architecture Antique (IRAA), Centre Camille Jullian – France

Les carbonates déposés par certaines sources chaudes continentales sont des enregistreurs potentiels des conditions paléoenvironnementales et paléohydrologiques, ainsi que des archives sédimentaires d'une « mémoire de la gestion de l'eau » par les sociétés humaines qui ont exploité ces eaux. Préservés au sein de structures archéologiques, ils offrent l'opportunité d'étudier la fonctionnalité, la nature et l'évolution diachronique des structures mises en oeuvre (aqueducs, salles thermales, citernes, etc.) par les sociétés du passé. Le site de Jebel Oust (Tunisie), qui se développe à l'époque antique autour d'une source chaude travertineuse, présente un sanctuaire implanté sur l'évent thermal, un complexe thermal situé 100 m en aval, alimenté par un profond aqueduc provenant de cette source. L'étude présentée ici est basée sur l'analyse PIXE à très haute-résolution de séquences de carbonates, pouvant atteindre des puissances pluri-décimétriques, préservés dans les différents secteurs du site : l'évent de la source chaude associé au sanctuaire, l'aqueduc thermal, et les pièces et canalisations de l'édifice thermal (piscines/*natatio* chaudes et tièdes, bassins de refroidissement).

Les analyses, réalisées à l'aide du dispositif AGLAE – Accélérateur Grand Louvre d'Analyses Élémentaires – du C2RMF (Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France), ont permis l'acquisition à très haute-résolution de la composition chimique en éléments majeurs et traces des séquences stratigraphiques carbonatées prélevées sur le site. Ainsi, nous identifions clairement les différents faciès sédimentaires (calcitiques et aragonitiques), ainsi que les variations cycliques des concentrations de certains éléments (Sr, Al, Fe, Mg...) au sein des séquences. Ces changements de faciès témoignent de variations significatives dans les écoulements hydrauliques interprétées et des modifications majeurs dans le fonctionnement des thermes (nature et fonction des salles, gestion des eaux chaudes) à l'époque antique. En outre, les analyses à haute résolution réalisées permettent de percevoir les variations géochimiques à l'échelle de la lamination infra-millimétrique du sédiment, qui traduisent des variations paléohydrologiques pluri-annuelles et/ou saisonnières.

Mots-Clés : Travertins, géoarchéologie, carbonates archéologiques, Antiquité romaine, gestion de l'eau, analyses PIXE, géochimie élémentaire



Des dépôts de paléotsunami à l'embouchure du Tibre (Ostia Antica, Italie) ?

Hugo Delile^{1,2*}, Ferréol Salomon³

¹INRAE, UR RiverLy, France

²CNRS UMR 5133 Archéorient, Maison de l'Orient et de la Méditerranée, Université de Lyon 2, France

³CNRS UMR 7362 Laboratoire Image Ville Environnement, Université de Strasbourg, France

Nous testons ici l'hypothèse récente d'une succession de cinq à sept générations de tsunamis qui auraient frappé l'ancien bassin portuaire d'Ostie (Italie) et le paléoméandre du Tibre (*Fiume Morto*) au cours des trois derniers millénaires. En raison des implications profondes de ces événements maritimes extrêmes sur notre connaissance de l'histoire de Rome, nous avons passé en revue l'ensemble des données pluridisciplinaires disponibles à l'embouchure du Tibre pour vérifier ou infirmer cette hypothèse. A l'aune de notre relecture des indices sédimentologiques, géomorphologiques, micropaléontologiques, géochimiques, chronologiques, archéologiques et historiques, il apparaît difficile de conclure que des inondations de tsunami se soient succédé près d'Ostie depuis le 1^{er} millénaire avant J.-C. Les embouchures fluviales ne constituent pas des milieux favorables pour identifier des dépôts de paléotsunami car la forte mobilité côtière et fluvial rend difficile l'enregistrement d'un événement unique de haute énergie dû à une inondation, une tempête ou un tsunami. En effet, les sédiments sont régulièrement remobilisés à l'embouchure du Tibre, aussi bien dans le chenal du fleuve qu'au niveau de l'avant-plage. A partir des données disponibles, nous montrons comment d'autres processus que les inondations spécifiques aux tsunamis pourraient être tout aussi responsables des couches de sédiments grossiers enregistrées dans le delta du Tibre (dépôts de tempêtes, d'inondations ou de berges). De manière générale cette étude questionne l'utilisation des indicateurs pluridisciplinaires pour identifier les dépôts de paléotsunami. A cet égard, nous montrons comment des niveaux élevés de plomb d'origine anthropique sont en mesure de réfuter la présence de dépôts de paléotsunami. En tant que telle, cette étude sera bénéfique à une large communauté de spécialistes des milieux côtiers.

Mots-Clés : Paléotsunami, tsunamites, delta du Tibre, Ostie, proxies pluridisciplinaires, géoarchéologie côtière, Méditerranée



Occupations et paysages protohistoriques du Cézallier – l'exemple du plateau de la Pénide (Espalem, 43)

André-Marie Dendievel^{*1}, Anne Duny², Hervé Richard³, Fabien Delrieu⁴

¹ Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, ENTPE, UMR5023 LEHNA, F-69518, Vaulx-en-Velin, France

² Paleotime, Villard-de-Lans, France

³ Univ. Bourgogne-Franche-Comté, CNRS, UMR 6249 Chrono-Environnement, Besançon, France

⁴ DRAC – SRA Auvergne-Rhône-Alpes, CNRS, UMR 5138 ARAr, Lyon, France

Un programme collectif de recherche est mené depuis 2018 dans le massif du Cézallier afin de reconstituer l'évolution de l'occupation du sol et des paysages durant la Protohistoire ancienne (âge du Bronze et 1^{er} âge du Fer). Cette communication présente les résultats obtenus sur le plateau de la Pénide (Espalem, Haute-Loire) où se situent un ensemble remarquable (1) d'anciens lacs entourés (2) d'un éperon barré supportant plusieurs séquences d'habitat et (3) d'une nécropole tumulaire. Après une reprise de la documentation (cartes anciennes, prospections et fouilles passées), de nouveaux sondages archéologiques et carottages accompagnés d'analyses paléoenvironnementales ont été réalisés depuis 2018. Ces opérations ont visé à caractériser les phases de fréquentation des sites d'habitat et funéraires, et à éclairer leur impact sur l'évolution des lacs et des paysages. Du Néolithique moyen à l'Âge du Bronze, plusieurs occupations ont été caractérisées. Néanmoins, les phases d'habitat et de pratiques funéraires ne semblent pas systématiquement synchrones : le plateau a été habité durant l'Âge du Bronze ancien et final IIIb, tandis que les *tumulus* fouillés ont été aménagés puis utilisés au Bronze moyen et final. Ces derniers sont organisés en groupements se distribuant autour des lacs qui devaient jouer un rôle symbolique structurant les pratiques funéraires et cultuelles. Des carottages et analyses paléoécologiques ont établi l'évolution du « lac Long » depuis 8500 av. J.-C. D'après nos résultats, le premier lac se serait comblé et aurait évolué en tourbière au cours du Néolithique. Redevenu un système de faible profondeur (lac, voire marais) durant l'Âge du Bronze final (1200-1000 av. J.-C.), le plateau subit une longue phase de modifications agro- pastorales. Drainés au XIX^e siècle notamment, les « lacs » du Plateau d'Espalem sont aujourd'hui des écosystèmes protégés abritant une flore et faune uniques (Natura 2000) et renfermant des archives sédimentaires et archéologiques hors du commun.

Mots-Clés : Site de hauteur ; nécropole tumulaire ; archives sédimentaires ; carottages ; datations



Évolution géomorphologique de la plaine alluviale de la Charente (segment fluvial Angoulême-Saintes) au cours de l'Holocène : apports d'une approche géoarchéologique et géomorphologique

Amélie Duquesne ^{*1}, Vivien Mathé ¹, Jean-Michel Carozza ¹

¹ Littoral, ENvironnement, Sociétés (LIENSS) – CNRS UMR 7266, La Rochelle Université, France

Les plaines alluviales sont des terrains d'étude privilégiés pour appréhender les relations entre les hommes et leur milieu sous le prisme de la co-évolution. Au cours de ces trois dernières décennies, les grands fleuves français (le Rhône, la Loire, la Seine et la Garonne) et européens (la Tamise, le Pô, l'Arno, l'Èbre et le Tage) ont fait l'objet de nombreux travaux aussi bien d'un point de vue historique, archéologique, géoarchéologique que géomorphologique. Pour autant, aucune étude approfondie n'a été menée sur l'évolution du fleuve Charente à l'Holocène alors qu'il présente un fort potentiel archéologique et des spécificités géomorphologiques propres aux systèmes fluviaux anastomosés à faible énergie.

L'objectif de ce travail est de proposer un modèle d'évolution géomorphologique de la Charente et de sa plaine alluviale sur le segment fluvial Angoulême-Saintes au cours de l'Holocène. Les dynamiques d'anthropisation et les modalités de construction et d'évolution de la plaine alluviale charentaise sont appréhendées selon une approche géoarchéologique et géomorphologique (géophysique, carottages).

Les premiers résultats soulignent une aggradation modérée de la plaine alluviale et une faiblesse de la mobilité latérale du chenal principal. Cette relative stabilité du système fluvial semble expliquer en partie la remarquable préservation et le faible enfouissement des sites archéologiques néolithiques, protohistoriques, antiques et médiévaux, témoins d'une occupation humaine ancienne de la Charente.

Mots-Clés : Géoarchéologie, Géomorphologie, Charente, plaine alluviale, cours d'eau à faible énergie, Holocène

^{*}Intervenante



Géoarchéologie de la tombe princière de Vix (Côte-d'Or, Bourgogne-Franche-Comté, France) : conditions d'implantation sur une terrasse alluviale quaternaire

Mégane Mignot ^{*1}, Amélie Quiquerez ¹, Jean-Pierre Garcia ¹

¹ ARTEHIS UMR 6298 – CNRS, Ministère de la Culture, Université de Bourgogne - France

La tombe princière de Vix est située en bordure sud-est du Bassin parisien à 7 km de Châtillon-sur-Seine. Elle a été découverte en 1953 et est datée du Premier âge du fer (fin du VI^{ème} siècle avant notre ère). C'est un tumulus de pierres et de terre de 40 m de diamètre, au centre duquel se trouve une chambre funéraire excavée sur 3 m de profondeur. De très riches objets étaient déposés dans la chambre, dont un célèbre vase en bronze de 1,60 m de haut d'importation méditerranéenne, témoignant de l'appartenance de la défunte à l'élite de l'époque.

À l'automne 2019, la tombe a fait l'objet de nouvelles fouilles archéologiques menées par l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap) et ArTeHiS (UMR 6298). Dans ce cadre, nos recherches ont porté sur les conditions d'implantation de la sépulture, au regard du terrain naturel qui l'accueille. Le relevé de coupes stratigraphiques et l'acquisition de profils de tomographie par résistivité électrique ont permis de documenter la nature et la géométrie du sous-sol. À l'emplacement de la tombe, des marnes d'âge jurassiques sont recouvertes par les dépôts graveleux d'une terrasse alluviale quaternaire. D'autres structures funéraires adjacentes au tumulus princier sont également installées sur ces dépôts.

À partir de ces observations, nous avons cherché à comprendre les raisons ayant pu pousser les populations protohistoriques à choisir cet endroit pour implanter la tombe princière et les autres structures funéraires. Nous discutons des avantages de la terrasse vis-à-vis d'autres emplacements, notamment la facilité à creuser ou la protection des structures face aux inondations. Nous formulons l'hypothèse d'un choix lié à la topographie de la terrasse, qui confère une visibilité importante aux sépultures.

Mots-Clés : Géoarchéologie, terrasse alluviale, tombe princière, implantation, Vix, Seine





Mille ans d'activités minières dans la vallée de Sainte-Marie-aux-Mines : palynologie, géochimie et documents historiques

Anne-Lise Mariet ¹, Carole Bégeot ¹, Pierre Fluck ², Frédéric Gimbert ¹,
Anne Véronique Walter-Simonnet ^{1*}

¹ UMR 6249 CNRS Chrono-environnement, Université de Bourgogne Franche-Comté, Besançon, France

² CRESAT, Université de Haute Alsace, Mulhouse, France

La richesse en filons de minerais du massif cristallin des Vosges a conduit à l'installation de nombreux sites d'extraction, notamment dans les Vosges Centrales. Le district minier de Sainte-Marie-aux-Mines a été l'un des sites les plus actifs pour l'extraction du plomb au niveau européen durant le XVI^{ème} siècle et le premier district filonien argentifère de France (Fluck, 2000). Les nombreux travaux d'archéologie minière menés dans cette vallée durant les trois dernières décennies ont révélé l'emplacement d'anciens sites miniers et retracé les techniques d'extraction et de transformation des minerais au cours du temps. L'ouverture des premières mines dans la vallée semble dater de AD 1000, mais il est certain que de nombreuses mines étaient exploitées durant le Moyen-Âge et que cette exploitation était très fructueuse (Fluck, 2000).

La petite séquence organique du marais de Le Hury a fait l'objet d'une analyse « multi-proxy » haute résolution (pollens, microfossiles non-polliniques, géochimie des éléments en traces) qui met en évidence un schéma paléoécologique spécifique aux activités métallurgiques (Mariet, 2016 ; Mariet et al., 2016). L'impact des activités minières sur la végétation a été moins prononcé que ce qui est représenté sur les gravures anciennes. Les déforestations, qui y sont décrites comme massives, sont absentes dans le bassin versant du marais, indiquant une gestion des forêts pendant au moins un millénaire. L'ouverture du paysage n'apparaît que lors des phases d'intensification des activités minières décrites dans les archives historiques. Enfin, la densité du couvert forestier augmente et l'écosystème se rétablit entre les phases d'exploitation.

Fluck, P. (2000). Sainte-Marie-aux-Mines ou Les mines du rêve. Soultz : Les Editions du Patrimoine Minier

Mariet A.-L., Bégeot C., Gimbert F., Gauthier J., Fluck P., Walter-Simonnet A.V. (2016). TheHolocene, 26, 1225-1236.

Mariet A.-L. (2016). Doctorat. Université de Franche-Comté.

Mots-Clés : activités minières, Sainte-Marie-aux-Mines, palynologie, géochimie, iconographie





Caractérisation et diffusion de la craie à bâtir médiévale en Normandie orientale

Damase Mouralis^{*1}, Daniel Ballesteros¹, Matthieu Bourgeois Armelle Couillet¹, François Delisle, Marion Le Texier¹, Carole Nehme¹, Aude Painchault, Sébastien Rey-Coyrehourcq, Dominique Todisco¹, Mariacristina Varano

¹IDEES – Normandie Université & CNRS : UMR6266 – 7 rue Thomas Becket, 76130 Mont-Saint-Aignan, France

Cette présentation s'intéresse à l'extraction, l'utilisation et la diffusion spatiale d'un archéomatériau : la craie comme pierre à bâtir, utilisée dans les constructions médiévales de Normandie orientale (nord de la France) du X^e au XIV^e siècle.

Cette étude s'appuie d'abord sur la mise en place d'une clé de détermination de la craie des bâtiments et carrières, fondée sur la caractérisation des propriétés physico-chimiques : pétrographie, pétrophysique, géochimie de roche totale et d'isotopes stables du strontium. En croisant des approches complémentaires, cette grille permet de caractériser les différents types de craie utilisées comme pierre à bâtir. Il est ainsi possible d'identifier les matériaux utilisés dans les bâtiments et de les attribuer aux carrières où le matériel a été extrait.

Les résultats permettent d'identifier trois zones de diffusion pour les cinq types de craies caractérisées : a) craies coniaciennes de la vallée de la Seine (type 1 : carrière de Caumont ; et type 2 : carrière de Vernon) ; b) craies cénomaniennes de la côte d'Albâtre (type 3 : craie glauconieuse de Fécamp) ; c) craies turoniennes de la haute vallée de la Risle (type 4 : clacarérite et type 5 : craie granuleuse). A ces différents matériaux s'ajoutent des calcaires Lutétiens importés des régions voisines (Pays d'Auge à l'ouest et région de Paris à l'est).

Les zones de diffusion de la craie suggèrent une structuration de la Normandie orientale en trois grandes zones d'influence centrées autour des principales carrières de craies de construction.

Finalement, notre présentation discute des distances de transport, des routes de diffusion, des zones de chalandises, des routes de diffusion et des modèles de diffusion spatiale de la craie comme archéomatériau. Il s'agit de montrer la manière dont cette diffusion témoigne de la structuration continue et renouvelée du territoire normand.

Mots-Clés : Archéomatériaux, caractérisation physico-chimique, craie, archéologie du bâti, Moyen-Âge, Normandie, diffusion spatiale



Géoarchéologie du paysage littoral de l'archipel de Nain (Labrador, Canada)

Clément Recq^{*1,2}, Najat Bhiry¹, Dominique Todisco^{1,2}, Héloïse Barbel⁶, Tobias Lauer³, Grégor Marchand⁴, Vincent Rinterknecht⁵, James Woollett⁶

¹ Centre d'études nordiques, Département de Géographie, Université Laval (Canada)

² UMR IDEES 6266, Université de Rouen, Département de Géographie (France)

³ Max Planck Institute of Evolutionary Anthropology (Allemagne)

⁴ UMR CReEAAH 6566, Université de Rennes 1 (France)

⁵ CEREGE, Université Aix-Marseille (France)

⁶ Centre d'études nordique, Département des sciences historiques, Université Laval (Canada)

Le paysage de l'archipel de Nain (Nunatsiavut, Labrador, Canada), est issu d'une histoire géomorphologique complexe. Le passage des glaciers successifs a façonné des fjords et vallées sous-marines interconnectées séparant des îles. A la suite du Dernier Maximum Glaciaire local (ca. 26.5 ka – 19 ka), lors des dernières phases de la déglaciation, la transgression marine eustatique a été suivie par une régression locale liée au relèvement isostatique postglaciaire.

La région possède un paysage relativement « jeune », jalonné d'éléments littoraux holocènes comme des plages, ou des deltas perchés. Peu après la fonte des dernières masses de glace et lors de la régression marine post-glaciaire, des cultures différentes ont occupé et parcouru cette région, depuis l'Archaïque maritime (ca. 8000-3500 BP) jusqu'aux Thuléens-Inuit (ca. 1250 AD). La formation et l'évolution postglaciaire du paysage conditionne les possibilités offertes par le milieu physique aux modalités de son occupation par les sociétés humaines (ressources, modes d'habitations et de mobilité) qu'il devient alors possible d'étudier ensemble.

Pour ce faire, différentes archives et méthodes ont été mobilisées. L'acquisition d'images satellite a permis la création de Modèles Numériques de Terrain et de cartes géomorphologiques à différentes échelles. Un protocole de datations croisées (¹⁰Be, ³⁶Cl, ¹⁴C, OSL), associé à des études stratigraphiques, permet une meilleure contrainte de la chronologie de la déglaciation et des courbes d'émersion des paléo-niveaux marins holocènes. Les études géoarchéologiques se doublent d'un enjeu patrimonial lié à l'érosion accélérée des vestiges d'habitats Inuit des derniers siècles. Cette présentation développera les enjeux d'une double approche consistant à analyser les dynamiques géomorphologiques de la formation du paysage de cet archipel et les modalités de son occupation par les sociétés humaines sur le temps long dans le cadre d'une démarche géoarchéologique contextuelle.

Mots-Clés : Géoarchéologie, Géomorphologie, Littoral, Déglaciation, Holocène, Labrador, Géochronologie



Development and optimization of non-invasive and portable techniques (pMS, pXRF, IA, pRaman) for granite discrimination in geoarchaeological survey

A. Triantafyllou^{1,2,3*}, N. Mattielli⁴, S. Clerbois^{5,9}, M. Vlieghe⁴, A-C. Da Silva¹,
G.Brkojewitsch^{6,7}

¹ Department of Geology, University of Liège, Sart Tilman, Liège, Belgium

² Department of Geosciences, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA

³ Laboratoire de Géologie de Lyon : Terre, Planètes, Environnement, Université de Lyon,

France⁴ Laboratoire G-Time, Université libre de Bruxelles, CP 160/02, Brussels, Belgium.

⁵ Centre de recherche en archéologie et patrimoine, Université Libre de Bruxelles, Brussels,

Belgium⁶ Pôle archéologie préventive de Metz Métropole, Metz, France

⁷ Centre Camille Jullian, UMR 7299, Aix-en-Provence, France

2One of the major challenges in archaeometry and geoarchaeology is to precisely characterize rocks of archaeological monuments and identify their provenance, linking them to their quarrying sites. Combining multiple analytical methods and diversifying discriminant proxies is the key to improve the distinction of sourcing regions with a higher spatial resolution. Numerous handheld analytical tools exist and have been used in geoarchaeological studies, i.e. portable X-ray fluorescence spectrometer (pXRF), portable Magnetic Susceptibility Meter (pMS), pLIBS, spectrophotography, but mainly for the characterization of fine-grained rocks (e.g., obsidian, flints, sandstones). Our study aims to apply and optimize these tools on medium to coarse-grained granitic rocks. Those were indeed highly valued materials under imperial Rome, particularly for the production of monumental monolithic columns, used in both public and private architecture.

We present a workflow to conduct a full characterization of medium to coarse-grained granitic rocks, using portable, non-invasive and reproducible approaches. It includes: (i) Image Analysis to quantify mineral phases proportions, grain size distribution using Weka trainable machine learning algorithm, (ii) pXRF (Bruker Tracer IV) to quantify the chemical composition. We developed a dedicated calibration method for several key elements (Si, Al, K, Ti, Ca, Fe, Mg, Mn, Cu, Sr, Ga, Ba, Rb, Zn, Nb, Zr, Y and Cr) by analyzing certified SRMs of igneous rocks and pure mineral phases, using the open-source CloudCal app. (iii) pMS (Bartington MS2K susceptibility system) to constrain the mineralogical content of the samples and complement the image analysis approach. These three methods were tested, and their operational conditions optimized, on six igneous rocks from in-house collection with variable grain sizes, mineral contents, diverse surface conditions and geochemical compositions. Ultimately, this workflow was applied on granitic and granodioritic rocks of onshore Roman monuments (southern Corsica). Our results allow us to link them to their quarrying sites in the Lavezzi islands with a high spatial resolution.

Mots-Clés : Geoarchaeology, Granite discrimination, pXRF, magnetic susceptibility, pRaman, ML-image analysis, Roman quarry, Corsica



Anthropisation et sédimentation varvée dans les mardelles de l'Est de la France

Anne Véronique Walter-Simonnet ^{*1}, Pascale Ruffaldi ¹, David Etienne ²

¹ UMR 6249 CNRS Chrono-environnement, Université de Bourgogne Franche-Comté, Besançon, France

² UMR 042 Carrtel, INRA-Université de Savoie Mont Blanc, Centre Interdisciplinaire Scientifique de la Montagne, LeBourget, France

Les forêts de plaine de l'Est de la France abritent de nombreuses dépressions humides fermées appelées mardelles. Ces dépressions originales sur le plan botanique sont aujourd'hui colonisées par des aulnaies marécageuses ou des tourbières à sphaignes. Véritables archives palynologiques et climatiques, elles offrent une vision temporelle continue de l'évolution de la végétation forestière immédiatement environnante et des changements d'usages des sols au cours des grandes périodes historiques d'anthropisation des paysages et de leurs impacts sur la biodiversité puisque leur formation remonte, pour les plus anciennes, à la fin de l'Âge du Fer (Ruffaldi et al., 2007 ; Etienne, 2011 ; Etienne et al., 2013). Si leur origine anthropique est probable, leur utilisation par l'homme est certaine pendant tout le Moyen Âge.

Deux de ces mardelles, l'une située dans la région de Reims, l'autre en Lorraine, ont fait l'objet d'une étude palynologique et sédimentologique fine. Toutes deux montrent un remplissage sédimentaire débutant par des argiles gris-bleu recouvertes par des sédiments argileux lités sur une épaisseur de plusieurs dizaines de centimètres. Les analyses menées sur ces sédiments lités (radiocarbone, épaisseur, colorimétrie, perte au feu, granulométrie, minéralogie, pollens, XRF) suggèrent un dépôt annuel. Ces pseudo-varves, dont les causes de formation restent à préciser, se sont déposées pendant la fin de la période Gallo-romaine et le Haut Moyen-Âge, alors que les mardelles sont entourées de forêts de chênes. Les variations de leur épaisseur suggèrent un dépôt soumis à des cycles.

Ruffaldi P., Ritz F., Richard H., Dambrine E., Dupouey J.-L. (2007) Actes du colloque "Forêt, archéologie et environnement", 2004. ONF-INRA-DRAC, Nancy : 69-77.

Etienne D. (2011). Doctorat. Université de Nancy.

Etienne D., Ruffaldi P., Dupouey J.L., Georges-Leroy M., Ritz F., Dambrine E. (2013). The Holocene, 23: 678-691.

Mots-Clés : mardelles, varves, anthropisation, Est de la France





Settlement of the Kvarner archipelago (northern Adriatic): archaeology, anthropology and environment

Marine Rousseau ^{*1}, Charly Massa ¹, Morana Čaušević-Bully ¹, Mario Novak ²,
Vincent Bichet ¹, Hervé Richard ¹

¹ Laboratoire Chrono-environnement UMR 6249 – Université de Franche-Comté – France

² Institute for Anthropological Research of Zagreb – Croatia

The interdisciplinary approach to the territorial development of the Kvarner archipelago, in particular Krk and Cres islands, is based on the examination of the long-term relationship between man and his environment. A particular attention is paid to the construction and transformation of territories and landscapes, as well as the fluctuation of different populations and their impact and/or adaptation to the environment. This interdisciplinary work combines approaches rarely encountered before. Thus, the methods and results obtained in the field of classical stratigraphic archaeology, spatial archaeology, anthropology, and associated specific analyses such as stable isotopes and ancient DNA are confronted with the disciplines of paleoenvironment. The evolution of local societies is thus associated with the mechanisms of the anthropization of local agricultural spaces.

The synthesis of these results sheds completely new light on the anthropization of these islands territories, on the transformations and interactions of the different populations, which have colonized these spaces throughout history, the way in which they have used and modified their environment. We can also understand how new populations and practices determine land management.

The paleoenvironmental approach is based on multiproxy analyses carried out on the sediment cores of three lakes located in the center of these islands. Geophysical and geochemical measurements of sediments (spectrocolorimetry, magnetic susceptibility, particle size, XRF, isotopic analysis of organic matter, tephrochronology) are associated with pollen grains and spores, non-pollen microfossils and micro-charcoals analysis. Thirty ¹⁴C dates, associated with ²¹⁰Pb, ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs dates, allow the construction of solid age / depth models.

The evolution of changes in the dynamics specific to each lake and their catchment area is then described precisely, since the introduction of the first agricultural practices: a succession of fluctuations in agrosystems can be highlighted during the Neolithic and of Protohistory, an important mutation affecting one of the lakes and its catchment area is visible around 2500 BP and hypotheses are put forward to explain the historical changes in the local environment.

Keywords : Adriatic Sea, Palynology, Archaeology, Vegetation cover, Croatia



T6.4. Origine de la Vie et implications exobiologiques





Abiotic synthesis of volatile and condensed organic compounds in the deep oceanic lithosphere

Muriel Andreani^{1*}, Gilles Montagnac¹, Clémentine Fellah¹, Flore Vandier¹,
Bénédict Ménez², Céline Pisapia², Isabelle Daniel¹, Jules Galipaud³,
Stéphan Borensztajn².

¹Laboratoire de Géologie de Lyon, Terre Planètes Environnement - Université Lyon 1, ENS Lyon, CNRSUMR5276, France.

²Institut de Physique du Globe de Paris – Sorbonne Paris Cité, Université Paris Diderot, CNRS UMR 7154, Paris, France

³Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, Ecole Centrale de Lyon,

Primitive environments favorable for life emergence is a missing key to the search for life and its origin in our solar system. Here we show that a combo of magmatic degassing and olivine hydration can provide unexpected precursors for prebiotic reactions and life development in igneous rocks. We identified gases (N_2 , H_2 , CH_4 , CH_4S) and various poly-aromatic carbonaceous compounds in olivine fluid inclusions forming the present-day oceanic lithosphere. They are associated with nanodiamonds, serpentine, magnetite, and carbonates at the micrometer scale. They result from drying while cooling of entrapped C-O-S-H magmatic fluids below $400^\circ C$, $P < 300 MPa$.

This considerably enlarges the range of abiotic organic compounds on the modern and primitive Earth, available for biotic and prebiotic chemistry. The occurrences of such complex carbonaceous material trapped with other primordial ingredients in micro-cavities, offers new pathways for abiotic organic synthesis in hydrothermal environments, on Earth and other planetary bodies, such as Mars where undisputable traces of life is actively sought.

Mots-Clés : carbonaceous material, serpentinization, oceanic lithosphere



Experimental evidence of condensed carbon formation during serpentinization in formate bearing fluids

Samuel Barbier^{1,2,*}, Muriel Andreani¹, Vincent Grossi¹, Eric.C Gaucher²,
Olivier Sissmann³, Isabelle Daniel¹, Bénédicte Menez⁴, Ingrid Antheaume¹,
Emmanuelle Albalat¹, Clémentine Fellah¹, Hervé Cardon¹

¹ Univ Lyon, Univ. Lyon 1, Ens de Lyon, CNRS, Laboratoire de Géologie de Lyon, France

² TOTAL SA – Centre Scientifique et Technique Jean Féger (ICSTJF) – TOTAL – France

³ IFP Energies Nouvelles, 92500 Rueil-Malmaison, Ile-de-France, France

⁴ Institut de Physique du Globe de Paris, Sorbonne Paris Cité, Université Paris Diderot, CNRS, Paris, France.

One of the principal theories about the origin of life is based on the abiotic reduction of inorganic carbon to various organic molecules in hydrothermal systems. This synthesis is most favored in ultramafic environments undergoing hydrothermal alteration where the serpentinization reaction efficiently produces H₂. Nevertheless, decades of hydrothermal experiments hardly succeed to produce abundant organic volatiles such as CH₄ and short hydrocarbons. Alternatively, natural observations increasingly show the occurrence of other abiotic compounds such as organic acids in fluids and carbonaceous matter (CM) within serpentinized rocks. The formation mechanisms of CM are poorly constrained, notably because we lack experimental evidences.

Here we serpentinized a peridotite using a fluid enriched in labelled formate (H¹³CO₂⁻), to mimic the more evolved fluids that can circulate in natural systems. Effects on the serpentinization reaction and on carbon speciation in fluids and solids are investigated. Experiments of 2 and 4 months were performed at 300°C - 30 MPa using peridotite powder (<40 microns) in a 0.29 M sodium formate solution. For both durations, H₂, ¹³CO₂, ¹³CH₄ and short alkanes were measured in the fluid, and the powder was completely indurated. A control experiment shows the decomposition of sodium formate to CO₂, H₂ and CO at this T, but no detectable CH₄ was produced. The analysis of the solidified powders showed the advancement of the serpentinization reaction, and the incorporation of carbon compounds into the solid phase. SEM-EDX observations showed serpentinite with larger magnetite grains mixed with C-enriched areas of long chrysotile fibers. FT-IR measurement confirmed the formation of complex carbonaceous materials widespread in the solid phases. These results suggest that advanced stages of serpentinization keep providing additional H₂ to the system but also allow the precipitation of metastable carbonaceous material, possibly helped by mineral surfaces. The nature and reactivity of such CM remains to be addressed but this opens new paths for organic synthesis under hydrothermal conditions.

Keywords : experimental serpentinization ; hydrothermal ; carbonaceous materials



Abiotic synthesis of carbonaceous matter during experimental serpentinization: a deep source of energy for early life

Isabelle Daniel¹ *, Renbiao Tao¹, Muriel Andreani¹, Gilles Montagnac¹, Céline Pisapia²,
Bénédicte Menez², Hervé Cardon¹

¹Université de Lyon, Université Lyon 1, ENS de Lyon, CNRS, UMR 5276, Lab. de Géologie de Lyon
- Terre, planètes, environnement, Villeurbanne F-69622 - France

²Université de Paris, Institut de physique du globe de Paris, CNRS, Paris - France.

Carbon and water are transported from Earth's surface surface of the mantle in subduction zones since the Eoarchean, at least. Among the variety of processes at play in subduction, serpentinization of forearc mantle by slab-released C-O-H fluid could capture large amount of carbon as it does for water, and constrain the long-term volatile recycling deeper into the mantle over geological time. Transformation of carbon during serpentinization of forearc mantle is not yet constrained, as our understanding of the speciation of carbon in those conditions has drastically changed over the last years. In this study, we experimentally simulate the high-pressure serpentinization of olivine with different Fe contents in C-O-H fluid (acetate aqueous solution) in the diamond anvil cell. Phase transformation of both mineral and fluid are monitored by in situ Raman spectroscopy. Experiments show that, during serpentinization of Mg-rich olivine at forearc mantle conditions, C-O-H fluid transfers into carbonate mineral or ion and carbonaceous matter. In contrast, hydrothermal alteration of Fe-rich olivine at forearc mantle conditions leads to the formation of goethite/hematite and most of C-O-H fluid transfers into carbonate mineral or ion and immiscible isobutane hydrocarbon, along with minor amount of carbonaceous matter. Fourier transform infrared measurements show that carbonaceous matter contains significant amounts of aromatics and aliphatic chains. In comparison with previous results on the high-pressure transformation of aqueous acetate in similar conditions ([Huang et al., 2017](#)), the present study shows that serpentinization is mandatory to the formation of the abiotic carbonaceous matter and that carbonaceous matter could capture and store much more carbon than carbonate in serpentinized forearc mantle. These new results have profound consequences on both the carbon speciation at depth and the carbon flux in subduction zones. More importantly, abiotic carbonaceous matter and/or lighter mobile hydrocarbon formed during serpentinization of forearc mantle at plate convergent margin may be a deep source of industrial energy at forearc basin and provide potential nutrients and energy for extant and extinct deep subsurface biosphere, and for the emergence of Life in these deep environments that are potential cradle of Life on Earth and other planetary bodies.

Mots-Clés : deep serpentinization, abiotic carbonaceous matter, geological carbon flux; deep energy



Detection of nucleotides adsorbed on to clay by UV Resonant Raman spectroscopy: a step towards the search for biosignatures on Mars

Gilles Montagnac ^{*,1}, Jihua Hao ^{1,2}, Ulysse Pedreira-Segade ^{1,3}, and Isabelle Daniel ¹

¹ Laboratoire de géologie de Lyon - Université de Lyon - France

² now at Department of Marine and Coastal Sciences - Rutgers University - USA

³ now at Rensselaer Polytechnic Institute - USA

The payload of Mars 2020 space mission includes a deep UV resonance Raman and fluorescence spectrometer SHERLOC dedicated to the detection of luminescence and Raman signal of condensed carbon and aromatic organics that could potentially be biosignatures. Among minerals detected on Mars surface, phyllosilicates exhibit a strong affinity to organic molecules, including nucleotides, which adsorption mechanisms onto clay minerals have been well documented, whilst there is a lack of an overview of Raman studies of organics adsorbed onto phyllosilicates.

Here, we used a deep UV resonant Raman setup to track down the signature of the nucleotide desoxyguanosine- 5'-monophosphate (dGMP) adsorbed onto selected minerals, pyrophyllite, chlorite, nontronite and montmorillonite. Excitation with a 244 nm laser indeed avoids luminescence of natural phyllosilicates and enhances the Raman signal of the organic molecule chosen here as a model biosignature. However, the deep UV energy of the laser focused onto the samples may induce severe photo-damage to the organic compound without adequate precaution. We used the Raman signature of dGMP to characterize deep UV effect after an irradiation of several minutes (8 - 260 mJ) until a stable spectroscopic signal is detected and could show that it is sensitive to minute amount of dGMP and adsorption mechanism.

The effect of widespread oxidants such as perchlorate on the Martian surface is also investigated here because of potential implication in the degradation of nucleotides under UV irradiation. In this study, we also discuss the strategy for the detection and preservation of adsorbed biomolecules onto clay surfaces.

Keywords: Deep UV resonant Raman spectroscopy, nucleotides, biosignature, adsorption



T7.3. Géologie lunaire et martienne



A terrestrial analog for Mars faulting? New insights from the Deformation Bands in the Shihtiping Tuffs, Taiwan

Thibault Cavailhes^{*1}, Atle Rotevatn ², Fredrik Kjenes ², Hanna Jervadilo³,
Jean-Luc Schneider¹, Chia-Yu Lu⁴, Etienne Leroy¹.

¹ Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (EPOC)

² Department of Earth Science University of Bergen PO Box 7800 5020 Bergen NORWAY

³ Aker BP ASA Oksenøyveien 10 1366 Lysaker Norway

⁴ Department of Geosciences, National Taiwan University 245, Choushan Road, Taipei, 106

Tuffs are consolidated volcanoclastic and pyroclastic deposits that may hold significant volumes of fluids in certain sedimentary basins of earth as well as extra-terrestrial sedimentary basins of telluric planets. In the last decade, faults and deformation bands have been recognized in layered deposits in the equatorial region of Mars and are believed to have channelized fluid- flow (water) and localized related-mineralization (calcite, zeolite). Providing terrestrial analog for such deformed rocks is critical to constrain tectonic/diagenetic processes that have occurred at Mars future exploration potential sites.

Volcanic tuffs are spectacularly well exposed in the Coastal range of Taiwan, where porous tuffs are related to past Luzon volcanic arc activity (5.1-5.2 My) and have been deformed during the recent stages of shortening (< 5My) related to Luzon Arc/Eurasian Plate collision. The deformation is mainly expressed by faults and 3 types of deformation bands that formed by strain localization.

Pure compaction bands show pore collapse and mineral grain reorganization expressing a loss of volume/porosity without any shear displacement. Based on their microstructure and lack of cataclastic deformation, we infer they will have limited impact on fluid-flow.

Reverse compactional shear bands show cataclastic mechanisms of deformation, involving intra- and trans-granular fracturing of minerals and volcanic glass. Porosity values are lower by 1 order of magnitude compared to the host rocks, thereby suggesting a significant impact on permeability and local fluid-flow.

Strike-slip compactional shear bands affect the whole pyroclastic and volcanoclastic succession, and feature similar deformation mechanisms as the *reverse compactional shear bands*, but with more intense cataclasis. The high network connectivity and greater band thickness suggest that these bands would have a far more significant impact on aquifer-scale fluid-flow than type (2).

This study offers a rare insight to structural heterogeneities (faults, fractures, deformation bands) and related mineralization (zeolites) in volcanic tuffs, providing calibration tools for the analysis of both Mars satellite and rover images.

Mots-Clés : Faulting; tectonics; volcanoclastics; pyroclastics; planetary geology

^{*}Intervenant



Classification de minéraux sur Mars à partir de données Raman et d'apprentissage automatique. Un premier pas vers l'analyse multi-senseurs.

Elise Clavé ^{*1}, Gilles Montagnac ², Gilles Dromart ², Olivier Beyssac³, Cécile Fabre ⁴, Olivier Forni ⁵, Sylvestre Maurice ⁵, Bruno Bousquet ¹

¹ CELIA – CNRS : UMR5107, Université de Bordeaux, CEA – France

² LGL-TPE, ENS Lyon - France

³ Laboratoire de Géologie, Ecole Normale Supérieure – CNRS : UMR8538 – France

⁴ GéoRessources – CNRS : UM7359, Université de Lorraine – France

⁵ IRAP – CNRS, université de Toulouse – France

À bord de *Perseverance*, l'instrument SuperCam permettra d'effectuer des analyses spectroscopiques de différentes natures à la surface de Mars [1]. Différentes techniques ont été choisies pour leur complémentarités technologique et scientifique, pour fournir des données d'une grande richesse sur la composition chimique, la minéralogie, la dureté etc. de la croûte martienne. Ainsi, les spectroscopies LIBS (*Laser Induced Breakdown Spectroscopy*), Raman, de luminescence et infrarouge pourront être utilisées en parallèle d'une caméra RMI et d'un microphone.

Pour extraire le plus d'informations de toutes ces données, nous utilisons des outils d'analyse de données multivariés et supervisés. L'apprentissage automatique (*Machine Learning*) fournit des outils permettant d'identifier les corrélations, redondances et complémentarités entre différentes variables, et ainsi de confirmer et affiner des résultats en croisant les données de différents capteurs. Des premières études sur la fusion des données LIBS et Raman ont été menées [2,3]. Notre étude porte sur l'utilisation d'arbres de décisions et de forêts aléatoires pour contraindre la minéralogie [4,5].

Pour le développement et les tests de nos algorithmes, nous travaillons dans un premier temps avec une base de données Raman, fournie par le Laboratoire de Géologie de Lyon. Nous testons des méthodes de classification et de pseudo-quantification. Ces algorithmes sont ensuite adaptés et appliqués à des données issues de plusieurs techniques.

Ces outils doivent en particulier nous permettre d'étudier *in situ* les carbonates martiens. Ces minéraux témoignent de la présence d'eau dans le passé de Mars. Ils ont été identifiés en particulier sur les marges du cratère Jézéro, site d'atterrissage de la mission Mars2020 [6,7]. Les carbonates possèdent aussi une grande capacité de préserver des traces de vie sur de très longues périodes [8], ce qui les rends particulièrement intéressants dans la recherche de vie dans le système solaire.

Mots-Clés : Mars, SuperCam, chimimétrie, Raman, LIBS, fusion de données, minéralogie, carbonates

[1] P. Willis, et al., 42nd COSPAR Scientific Assembly B4.2-40-18

[2] P. Sobron, et al., 45th Lunar and Planetary Science Conference, 2014, #2875.

[3] K. Rammelkamp, et al., Journal of Raman Spectroscopy, 2019, 1-20.

[4] L. Breiman, et al., Classification and Regression Trees, 1984.

[5] L. Breiman, Machine Learning, 45, 2001, 5-32.

[6] B. Ehlmann, et al., Journal of Geophysical Research: Planets 114 (E2), 2009.

[7] B. Horgan, et al. Icarus, 2020.

[8] J. D. Farmer, D. J. des Marais, Journal of Geophysical Research: Planets 104 (E11), 1999, 26977-26999



Géochimie des roches sédimentaires du cratère Gale : implications pour l'altération aqueuse sur Mars

Erwin Dehouck^{*1}, Nicolas Mangold², Agnès Cousin³, Olivier Gasnault³, Olivier Forni³, Gaël David³, Jérémie Lasue³, Pierre-Yves Meslin³, William Rapin⁴, Sylvestre Maurice³

¹ Univ Lyon, Univ Lyon 1, ENSL, CNRS, LGL-TPE, F-69622, Villeurbanne, France

² Laboratoire de Planétologie et Géodynamique, CNRS, UMR 6112, Université de Nantes, Université d'Angers, Nantes, France

³ Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, Université Paul Sabatier, Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse, France

⁴ Sorbonne Université/MNHN, IMPMC, CNRS, France

Le rover Curiosity de la NASA explore depuis 2012 l'intérieur du cratère Gale, formé il y a ~3,6 Ga, dans le but d'étudier l'habitabilité et l'évolution climatique de Mars primitive. A son bord, se trouve l'instrument franco-américain ChemCam, qui permet de déterminer la composition chimique des roches jusqu'à plusieurs mètres de distance par Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). Complétées par les mesures réalisées par les autres instruments du rover, en particulier le diffractomètre à rayons X CheMin, les données collectées par ChemCam permettent d'évaluer l'intensité de l'altération aqueuse subie par les roches sédimentaires déposées dans le cratère Gale. Pour cela, nous utilisons ici le Chemical Index of Alteration (CIA), qui quantifie le lessivage de trois éléments mobiles – calcium, sodium et potassium – par rapport à l'aluminium, considéré comme immobile.

Les résultats obtenus montrent que malgré la présence de ~20 wt% de minéraux argileux (smectites), les mudstones de la formation Yellowknife Bay analysées sur Aeolis Palus (la plaine dans la partie nord du cratère) ont conservé une composition chimique proche de celle de la source. Ceci indique une altération sans perte d'éléments mobiles, sans doute à faible rapport fluide/roche. Au contraire, les mudstones de la formation Murray, exposées sur plusieurs centaines de mètres d'épaisseur sur le flanc d'Aeolis Mons (la pile sédimentaire qui occupe le centre du cratère), montrent une augmentation progressive du CIA, jusqu'à des valeurs de ~60, indicatrices d'une altération plus poussée, en système ouvert. Les terrains les plus récemment explorés par Curiosity, pour lesquels les minéraux argileux sont détectables depuis l'orbite, montrent également des valeurs de CIA proches de 60.

Ces résultats mettent donc en évidence une histoire aqueuse complexe dans le cratère Gale, avec des variations probablement importantes de l'abondance de l'eau liquide en surface, avant sa disparition définitive.

Mots-Clés : Mars, altération aqueuse, minéraux argileux, smectites, géochimie



Relationship between subsurface ice reservoirs and Amazonian landslides in the Nilosyrtris Mensae region of Mars

Anthony Guimpier^{*1}, Susan J. Conway¹, Nicolas Mangold¹

¹ Laboratoire de Planétologie et Géodynamique (LPG) – CNRS: UMR6112, Université de Nantes – France

The region of Nilosyrtris Mensae on Mars is characterised by numerous glacier-like-forms and this study focuses on four landslides located in the southern part of this region. These landslides formed in the late Amazonian period, and the glaciers are also believed to be of a similar age. The aim of this study is to understand whether there is a relationship between the glacial ice in Nilosyrtris Mensae and these landslides.

We use images from ConTeXT imager (CTX), Colour and Stereo Surface Imaging System (CaSSIS) and High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) with resolution of 6 to 0.25 m/pixel and elevation data at 2m/pixel to perform regional and local analyses. We also use terrestrial analogues to better understand the conditions leading to the martian landslides.

The Nilosyrtris Mensae region has many viscous flow features (VFF), which are thought to be nearly pure ice tens of metres thick or more, overlain by debris akin to debris covered glaciers on Earth. VFF are located in the northern part of Nilosyrtris Mensae, and at around 27°N, the frequency of VFF decreases and is replaced by degraded latitude dependant mantle (LDM) on north-facing slopes. LDM is thought to be a metres thick layer of ice and dust laid down in the last few millions of years. Its degradation is thought to be caused by sublimation of the ice resulting in a rough, pitted surface texture.

The 4 landslides are located in a 25 km in diameter impact crater, at 27° latitude. The landslides have well developed lateral levees, high relief lobate flow fronts and propagate over ~20° slopes. These characteristics are typical of earthflows on Earth, which require saturation by liquid water to move, hence liquid water may also be involved on Mars.

Ice melting can cause saturation of the ground, leading to the formation of landslides. By understanding the distribution, extent and character of ice-related features in this region we aim to assess their influence on the formation of these 4 landslides.

Mots-Clés : Mars, landslides, earthslides, viscous flow features, latitude dependant mantle



Étude expérimentale en conditions martiennes de l'influence de la teneur en limon/argile sur la condensation et sublimation du givre de CO₂ à la sub-surface de sédiments : implication pour les ravines sur Mars

Clémence Herny ^{*1}, Susan Conway ², Matthew Sylvest ³, Camila César ¹, Charlotte Marriner ³, Kelly Pasquon ², Axel Noblet ², Manish Patel ³, Nicolas Thomas ¹

¹ Physikalisches Institut - Universität Bern - Suisse

² Laboratoire de Planétologie et Géodynamique, CNRS : UMR 6112 - Université de Nantes - France

³ School of Physical Sciences - The Open University - UK

Des processus physiques modifiant la surface par transport sédimentaire sont actuellement à l'œuvre à la surface de Mars. Par exemple, nous observons l'évolution et la création de ravines sur divers substrats. Mars est soumise à un cycle saisonnier de condensation/sublimation du CO₂, présent dans l'atmosphère, avec un dépôt de givre jusqu'à 30° de latitude. L'activité des ravines est attribuée à la sublimation du givre de CO₂ puisque cette période est concordante avec la plupart des modifications observées. Les processus géomorphologiques associés au givre de CO₂ sont exotiques, et bien que les observations satellites, les simulations numériques et de récentes expériences attestent du potentiel rôle déterminant du givre de CO₂ comme agent géomorphologique à la surface de Mars, nous disposons actuellement de peu de connaissances sur le rôle de la sublimation/condensation dans le transport sédimentaire.

Afin d'améliorer nos connaissances sur le sujet, nous menons des expériences en laboratoire, à basse pression et basse température, afin de simuler les conditions atmosphériques martiennes. Le dispositif expérimental permet de condenser du givre de CO₂ à la (sub)surface d'une pente de sédiment. Au cours de la phase de sublimation, nous étudions les potentielles modifications de la surface et le transport sédimentaire. La température du sédiment est contrôlée par des capteurs de température. L'évolution de la surface est étudiée grâce à des caméras qui permettent, entre autres, de quantifier le volume de sédiment transporté par stéréophotogrammétrie. Parmi les paramètres influençant le volume de sédiment mobilisé lors de la sublimation du givre de CO₂, nous avons choisi d'explorer la teneur en sédiments fins (limon/argile) dans le sédiment (sable). Cette étude nous permettra de mieux comprendre l'interaction entre la diffusion du gaz dans les pores du sédiment et les instabilités de pente engendrées afin d'étudier les ravines martiennes et leurs activités.

Mots-Clés : Givre de CO₂, sublimation/condensation, transport de sédiment, ravines, geyser, Mars



Gullies on Mars and observations of seasonal ices in CaSSIS and HiRISE data

Kelly Pasquon ¹, Susan J. Conway ^{*1}, Antoine Pommerol ², Jan Raack ³, Meven Philippe ¹, Axel Noblet ¹, Ginny Gulick ⁴, Livio L. Tornabene ⁵, Nick Thomas ², Gabriele Cremenose ⁶, the CaSSIS and HiRISE teams.

¹ Laboratoire de Planétologie et Géodynamique (LPG), CNRS : UMR6112, Université de Nantes - France

² Physikalisches Institut, University of Bern - Switzerland

³ Institut für Planetologie, Westfälische Wilhelms-Universität - Germany

⁴ SETI Institute & NASA Ames Research Center, Moffett Field, California - USA

⁵ Institute for Earth and Space Exploration and the Department of Earth Sciences, University of Western Ontario - Canada

⁶ Osservatorio Astronomico di Padova, INAF, Padova - Italy

Gullies on Mars are kilometre-scale downslope mass wasting systems that resemble water- worn gullies on Earth. Recent observations have revealed that they are active today and tend to be active when the seasonal frosts are sublimating in spring. Mars' axial tilt is similar to the Earth's, hence it experiences similar seasons. Instead of water ice snow extending towards the mid-latitudes in winter, it is mainly CO₂ ice that condenses onto the surface. In this study we use images from the Colour and Stereo Surface Imaging System (CaSSIS) aboard ESA's TraceGas Orbiter (TGO) and the High Resolution Science Imaging Experiment aboard NASA's Mars Reconnaissance Orbiter to study the relationship between surface frosts and gullies. The colour images from both instruments are useful for the identification of surface frosts, particularly when their distribution is local and patchy. Our initial study focusses on gullies found in the south polar region of Mars, because MRO and TGO are polar orbiters which allows higher frequency of temporal monitoring. Our results reveal that gully-alcoves defrost before the fans and gullies in general defrost later than surrounding terrain. This suggests activity is driven by the availability of "hot" sediment in the alcoves triggering sublimation of CO₂ ice as material falls down the gully.

Acknowledgments: KP, SJC, MP and AN are grateful for the financial support of CNES for their CaSSIS work. The authors thank the spacecraft and instrument engineering teams for the successful completion and operation of CaSSIS. CaSSIS is a project of the University of Bern funded through the Swiss Space Office via ESA's PRODEX programme. The instrument hardware development was also supported by the Italian Space Agency (ASI) (ASI-INAF agreement no. I/018/12/o), INAF/ Astronomical Observatory of Padova, and the Space Research Center (CBK) in Warsaw. Support from SGF (Budapest), the University of Arizona (LPL) and NASA are also gratefully acknowledged.

Mots-Clés : Martian gullies, seasonal frosts, remote sensing

^{*}Intervenant



Exomars at Oxia Planum, probing the early Martian environments.

C. Quantin-Nataf^{1*}, J. Carter², L. Mandon¹, P. Thollot¹, E. Dehouck¹, M. Volat¹

¹Laboratoire de Géologie de Lyon Terre, Planètes, Environnement (CNRS-ENSLyon-Université Lyon1), 2 rue Raphaël Dubois 69622 Villeurbanne Cedex, France,

² Institut d'Astrophysique Spatial, Université Paris 11-Orsay, France.

The European Space Agency (ESA) ExoMars 'Rosalind Franklin' Rover will launch in 2022, and land on Mars in 2023. The goals of the mission are to search for signs of past and present life on Mars, to investigate the water/geochemical environment as a function of depth in the shallow subsurface, and to characterize the surface environment. Of these, the key goal is the search for ancient biomarkers. To meet this scientific goal and minimize the risk of landing, eight candidate sites were whittled down to only one: Oxia Planum.

Thanks to several generations of Martian orbiters, the surface of Mars can be imaged down to 50 cm per pixel, measured in term of topography and investigated in term of mineralogy thanks to several spectrometers at different wavelength and spatial resolution. Combining this complementary data set, the characterization of the landing sites is possible both in term of engineering constraint and geological evolution.

Oxia Planum exhibits outcrops of Noachian phyllosilicates over hundreds of kilometers of terrain. The site also hosted during Noachian times a standing body of water leading to the formation of a delta fan enriched in hydrated silicates. Hence, this site recorded at least two clearly distinct ancestral aqueous environments and contexts, both during the Noachian: 1) the alteration of the 50 to 100 m of layered deposits and 2) the fluvio-deltaic system post-dating wide-spread clay-rich layered unit. The intense erosion undergone by Oxia planum attested by both the lack of impact craters and inverted morphologies, would have uniquely exposed these two types of noachian sediments. Deciphering the formation environments for such diverse noachian altered rocks would fulfill the goals of the ExoMars Rover.

Mots-Clés : Mars, landing site, exomars



T7.4. Impacts



Supercritical and subcritical regimes of MgO

Tim Bögels^{*1}, Razvan Caracas¹

¹CNRS, École Normale Supérieure de Lyon, Laboratoire de Géologie de Lyon - France

The Earth-Moon system and its formation is a topic of great scientific interest, and great debate over the past decades. The giant impact hypothesis is the currently accepted model trying to explain the formation of our moon. However, many details about the parameters of the impact and of the impactor are missing. Currently there is a large effort to build reliable thermodynamic descriptors for the building materials of the two bodies involved in the impact. MgO is one of the major components of the bulk earth and moon. Here we investigate the subcritical and supercritical regimes of MgO using ab initio molecular dynamics. We find the critical temperature between 6500 and 7000K, which is likely related to its refractory properties. We build the Hugoniot equation of states and characterize MgO under extreme shock. Then we provide insight into the speciation of liquid MgO and the liquid-gas separation. We see a shift in Mg-O speciation towards lower degrees of coordination as the temperature is increased from 4000K to 10000K. This shift in speciation is less pronounced at higher densities. The majority of the chemical species forming the incipient gas phase consist of isolated Mg and O ions and some MgO and O₂.

This research was supported by the European Research Council under EU Horizon 2020 research and innovation program (grant agreement 681818 – IMPACT to RC)

Mots-Clés : MgO, supercritical, ab initio MD, giant impact



« Impacts » : leur impact biologique et environnemental

Philippe Lambert ^{*1}

¹ Centre International de Recherches et de Restitution sur les Impacts et sur Rochechouart (CIRIR)- Rochechouart - France

Les « Impacts », la science qui s'y rattache, la prise de conscience de leur rôle essentiel dans la formation et dans l'évolution de tous les objets planétaires du système solaire et de l'Univers, tout cela est très récent et commence avec les missions « Apollo ». Au-delà de la dynamique extrême du phénomène et de son caractère géologique et planétologique « fondamentale », qu'en est-il de ses incidences biologiques et environnementales? La reconnaissance par les scientifiques de l'origine « cosmique » de la grande extinction à la limite Crétacé-Tertiaire éclaire la dimension catastrophique et dévastatrice du phénomène. Depuis les années 80 l'humanité prend progressivement conscience du risque majeur associé aux astéroïdes lequel est classé dans la conscience collective au deuxième rang derrière la guerre nucléaire (et biologique ?). La planétologie comparée montre que depuis sa formation, la Terre a nécessairement connu des dizaines d'impacts comparables en taille à celui de Chicxulub, et d'autres bien plus grands encore, notamment dans la première moitié de son existence. Dans ce contexte, le nombre et l'importance des extinctions en masse connues sur Terre à ce jour sont nécessairement largement sous-estimés, de même que les effets environnementaux associés. L'hypothèse d'une suite d'apparition et d'extinction totale de la Vie sur Terre consécutive à de très grands impacts (cratères de 500 km de diamètre et plus) semble d'autant plus vraisemblable que les conditions propices à l'émergence de la Vie dans le système solaire se révèlent remplies très tôt, ce qu'atteste la chimie pré biotique déjà très complexe d'une variété de météorites carbonées représentatives des objets les plus primitifs du système solaire. La Vie et son évolution sur Terre à partir du Cambrien, correspondrait alors au dernier épisode de cette « série ». Aux grands impacts « stérilisateurs » s'ajoutent ceux plus modestes et beaucoup plus nombreux qui ont nécessairement causé des modifications environnementales et affecté la Vie sur Terre à l'échelle d'un continent (impacts dans la gamme 30-100 km de diamètre, comme celui de Rochechouart-France). Ces effets ne sont pas encore connus, non qu'ils n'existent pas mais juste qu'ils n'ont pas encore été recherchés comme tels, et devront l'être. Enfin, l'impact le plus extraordinaire et le plus important des « Impacts » sur le vivant et sur les environnements planétaires tient probablement aux récentes découvertes de la petite communauté scientifique dédiée à l'étude des roches issues des impacts, travaux qui pourraient marquer une nouvelle ère dans l'histoire de la connaissance et de l'Humanité. Ils indiquent que les grands impacts contribuent directement à l'habitabilité des planètes et qu'ils ont pu jouer un rôle majeur dans leur fertilisation et dans l'émergence de la Vie dans le système solaire et au-delà. La Vie sur Terre ne serait pas un cas isolé, ni dans le temps ni dans l'espace, et ne serait pas l'exception qui la distingue de toutes les autres planètes. La Vie pourrait apparaître, disparaître, réapparaître, se déplacer et s'être déplacé d'un objet planétaire à un autre à la faveur des collisions. Nous éclairerons plus en détail ces interprétations ainsi que les approches interdisciplinaires des acteurs de cette petite communauté qu'il conviendrait de faire connaître et de développer compte tenu de la nature et de la portée des « messages » contenus dans la géologie des structures d'impacts conservées sur Terre.

Mots-Clés : Impacts, Astéroïdes, Extinctions, Emergence de la Vie, Habitabilité des planètes, Panspermie



Recherches en cours sur l'Impact de Rochechouart : Dimension et typologie : le mystère se creuse !

Philippe Lambert ^{*1}

¹ Centre International de Recherches et de Restitution sur les Impacts et sur Rochechouart (CIRIR)-2,
Faubourg du Puy du Moulin- 87600 Rochechouart - France

Les brèches qui affleurent dans la région de Rochechouart-Chassenon, dans le Limousin, sont connues des géologues depuis que la géologie existe, mais il faut attendre la fin des années 1960 pour que leur origine, jusqu'alors sujette à controverse, soit reconnue par F. Kraut.

L'impact de Rochechouart affecte le socle hercynien à la marge ouest du Massif Central. Les datations des dix dernières années convergent pour lui attribuer un âge compris entre 207 et 201 Ma. Malgré son intérêt évident et une accessibilité remarquable, le site a reçu beaucoup moins d'attention que d'autres grandes structures d'impact terrestre. Mais cela change à la faveur du CIRIR qui rassemble la communauté internationale pour l'étudier. A ce jour un peu plus de 70 projets de recherche sont en cours ou en préparation. Le premier grand résultat obtenu par le CIRIR a été la programmation et la réalisation d'une vaste campagne de forage, la première de l'histoire du site. Menée en 2017-2018, elle a été réalisée au profit à la fois de la communauté scientifique internationale et de la Réserve naturelle nationale de l'Astrolème de Rochechouart-Chassenon, laquelle, avec le soutien de l'Etat et de la communauté de communes Porte Océane du Limousin, a apporté le financement. Une série de 18 forages carottés a été réalisée dans 8 des 12 sites de la réserve, le long de deux traversées diamétrales de 10 km dans la formation bréchique correspondant au remplissage du cratère. Cette dernière forme une unité stratigraphique horizontale qui, du fait de l'érosion, est très mince (<100 m) et occupe les points hauts de la topographie actuelle dans une zone sub centro-symétrique de 10-12 km de diamètre. En dépit de son caractère pelliculaire, cette série est très complexe et très riche. Tous les faciès d'impactites y sont représentés. Les forages avaient notamment pour but d'éclaircir les relations stratigraphiques entre les différents types de brèches ainsi que la géométrie du plancher du cratère. Au total près de 540 m de carottes ont été récupérés. Les forages révèlent que l'impact de Rochechouart, comme celui de Chicxulub, a déclenché un gigantesque tsunami, ce qui n'est pas sans incidence sur les interprétations paléogéographiques et environnementales de l'époque. Nous nous intéresserons en particulier aux résultats qui éclairent les aspects de dimension et de morphologie du cratère initial. Nous verrons que selon les critères retenus, la plage des diamètres possibles pour le cratère initial varie considérablement et s'élargit tant vers les grandes dimensions, que vers les petites. A l'évidence quelque chose d'importance nous échappe et met en cause tout ou partie de ce qu'on croit connaître de la mécanique et/ou de la géologie des grands impacts.

Remerciements : L'auteur remercie tous les membres du CIRIR dont la Réserve pour leur confiance et leur soutien ainsi que les communautés locales (en particulier Porte Océane du Limousin) pour leur soutien financier.



Mots-Clés : Impacts, Rochechouart, Tsunami, Chicxulub, Mécanique des Impacts



Dynamics of ejecta during the formation of an impact crater: discrete numerical simulations

Vincent J. Langlois ^{*1} & Cathy Quantin ¹

¹ Laboratoire de Géologie de Lyon: Terre, Planètes, Environnement – France

The ability of crater chronometry techniques to assess ages and evolution of planetary surfaces has been recently challenged, especially in the case of using small impact craters because of the expected secondaries. Many studies have detailed the secondaries formed by a well-recognized primary impact in terms of shape and repartition, based on the high resolution imagery available on the surfaces of the Moon or Mars. However, well-used numerical models of impact crater formation which use continuous approaches (hydrocodes) are not always well suited to reproduce the fragmentation processes at small scales that are required to explain the secondary cratering. Because they rely on a mesh, these models, though very efficient in predicting the deformations within the target and the properties of the subsequent crater, cannot take into account explicitly the fragmentation of material, which leads to the ejection of particles of variable sizes.

Therefore, we propose here a new Discrete Element Method (DEM) to simulate impact cratering in order to better understand the fragmentation of ejected material and consequently the secondary craters formed after a primary impact. We model the impact of a small projectile on a target made of 800,000 particles, initially bound together by cohesive forces. We validate this approach by investigating the growth of the transient crater as well its final shape, and compare them to the results of classical continuous simulations. The volume of ejecta and their velocity distribution is compared to existing analogical experiments of impacts in granular materials. The size and trajectory of all blocks of particles ejected during the impact is computed explicitly, which allows us to determine the radial distribution of secondary craters.

Mots-Clés : impact cratering ; ejecta blanket ; secondary craters ; discrete element simulations



Géophysique de structures d'impact terrestres : nouvelles données et modélisation

Quesnel Yoann^{1*}, Lambert Philippe², Dellai Nessrine³, Rochette Pierre¹, Uehara Minoru¹, Gattacceca Jérôme¹, Demory François¹, Munsch Marc⁴, Le Maire Pauline⁵, Sailhac Pascal⁶, Lofi Johanna⁷, Champollion Cédric⁷, Osinski Gordon⁸

1 – Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, INRAe, Coll de France, CEREGE, Aix-en-Provence -

France2 – CIRIR, Rochechouart - France

3 – Faculté des Sciences de Tunis -

Tunisie4 – Université de

Strasbourg, IPG - France

5 – Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) -

France6 – Univ Paris-Sud, GEOPS, Orsay - France

7 – Univ Montpellier, Géosciences - France

8 – Department of Earth Sciences, University of Western Ontario, London - Canada

Les cratères d'impact de météorites répertoriés sur Terre sont souvent fortement érodés ou enfouis. Cependant, les propriétés physiques des éventuels restes de brèches d'impact et surtout de roche-cible trahissent l'occurrence d'un impact dans le passé, et permettent de mieux comprendre les phénomènes complexes mis en jeu lors d'un tel événement géologique. L'étude présentée montrera l'apport de la géophysique, que ce soit par l'acquisition de nouvelles données et/ou par l'analyse, la modélisation et l'interprétation de mesures existantes, pour révéler la structure et la géologie de certains cratères d'impact. Nous insisterons notamment sur la relation entre taille du cratère initial, état d'érosion, type de cible (cristalline ou sédimentaire) et anomalies géophysiques pour les structures d'impact de Rochechouart (France), Tunnunik (Arctique, Canada) et Chicxulub (Mexique).

Mots-Clés : cratère d'impact terrestre, géophysique, érosion, Rochechouart, Tunnunik, Chicxulub



Influence of water on the critical point of silica

Renata Schaan ^{*1}, Razvan Caracas ¹

¹Laboratoire de géologie de Lyon : Terre, planètes et environnement – CNRS : UMR 5276, École Normale Supérieure de Lyon – France

Silica is a major rock forming material in our Solar System. The formation of rocky bodies depends on accretion and giant impacts, which often produce silicate fluids. The most recent theory of Giant Impact for the Moon formation implies in the formation of a synestia in the aftermath of the impact. In this scenario, a hot silicate atmosphere would have formed and if there would be an ocean, it would be vaporized as well together with the material. Hence, placing the critical point of the $\text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ binary system has implications for understanding the conditions at the formation of the Earth-Moon system, but also for other geological scenarios such as subduction zones.

Here we study the effect of H_2O on the supercritical and subcritical properties of SiO_2 fluids from first-principles molecular dynamics modeling. We use cristobalite with 72 SiO_2 units as a starting condition. The material was heated up to 3000K and 4000K and then 8 and 16 units of H_2O were added to the system. We show the variation of the spinodal lines and we discuss the polymerization of the fluids. We analyze the chemical speciation and the vaporization.

Mots-Clés : critical point, silica, water, impact, ab initio, supercritical fluid

Acknowledgements: This research is supported by the European Research Council (ERC) under the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme (grant agreement #681818 – IMPACT to RC). The simulations were performed on the GENCI supercomputers (eDARI/CINES grants x106368).



The behavior of volatile species in the Early Earth's global magma ocean

Natalia V. Solomatova^{*1}, Razvan Caracas^{1,2}

¹ CNRS, Ecole Normale Supérieure de Lyon, Laboratoire de Géologie de Lyon LGLTPE UMR5276, Centre Blaise Pascal, 46 allée d'Italie Lyon 69364, France

² The Center for Earth Evolution and Dynamics (CEED), University of Oslo, Blindern, Oslo, Norway

The amount of volatile elements stored in hidden reservoirs, particularly the lower mantle and iron-rich core, is currently uncertain, and estimates of the flux of volatiles between the surface and mantle are model-dependent. To improve our understanding of Earth's global volatile cycle, it is critical to characterize the forms in which volatile elements existed in the molten Early Earth. Thus, using atomic simulations (i.e., first-principles molecular dynamics), we have characterized the vaporization behavior of volatile elements, particularly carbon and hydrogen, in silicate melts representing the composition of the Bulk Silicate Earth as a function of pressure, temperature and oxidation state. We describe the speciation of all volatile species and quantify the amount of carbon and hydrogen in the vapor phase compared to the silicate melt to provide insight into their fate after the Moon-forming impact. We find that the concentration of carbon and the oxidation state of the melts dictate the speciation of the vaporized carbon species, but do not affect the overall volatility of carbon. The concentration of CO₂, a greenhouse gas, increases at the expense of CO as the density of the system decreases, which would have presumably contributed to the formation of a hot dense atmosphere during the cooling of Early Earth. At the very high temperatures of 5000-6000 K, we predict that bubbles in the magma ocean contained a significant fraction of silicate vapor in addition to CO and CO₂, affecting the transport and rheological properties of the magma ocean. Furthermore, we examine the formation and dissociation mechanisms of methane, both as a vapor species and dissolved in the highly-reduced silicate melt, tracing the fate of carbon and hydrogen upon decomposition, and describing the kinetic barriers to the formation of methane in the Early Earth.

We acknowledge support from the European Research Council under EU Horizon 2020 research and innovation program (grant agreement 681818 – IMPACT to RC) and access to supercomputing facilities via the eDARI stl2816 grants, the PRACE RA4947 grant, and the Uninet2 NN9697K grant.

Mots-Clés : carbon; hydrogen; vaporization; Early Earth; magma ocean; giant impact



T8.1. Les sédiments littoraux et sublittoraux : sources, stocks, transport et morphologies de dépôt



Les gradients géochimiques : une nouvelle approche géostatistique d'interprétation du transport sédimentaire

Noémie Baux^{1,2*}, Anne Murat^{1,2}, Emmanuel Poizot^{1,2}, Yann Méar^{1,2}, Gwendoline Gregoire^{1,2}

¹Conservatoire National des Arts et Métiers. INTECHMER, France

²Normandie Univ, UNICAEN, Laboratoire des Sciences Appliquées de Cherbourg, EA 4253, France

Sur la base d'échantillons sédimentaires, deux principales approches existent pour l'étude des processus de transport. D'une part, il est de plus en plus fréquent d'utiliser des analyses multivariées (ACP) associées à la cartographie des résultats (GIS) et à la distributionspatiale des éléments géochimiques. Cette approche a le désavantage d'être chronophage et l'interprétation des résultats peut s'avérer complexe de part la multiplication du nombre de graphiques et de cartographies. L'implémentation d'éléments géochimiques reste également limitée. D'autre part, l'étude sédimentaire peut être réalisée en considérant les paramètres granulométriques (moyenne, classement et asymétrie de la distribution) intégrés dans un modèle géostatistique (Grain Size Trend Analysis, GSTA) afin de déterminer des vecteurs de transports. Cette méthode se base toutefois uniquement sur trois paramètres granulométriques dont la fiabilité peut être discutée, par exemple, lorsque les sédiments sont plurimodaux.

Une nouvelle approche combinant les deux méthodes Poizot *et al.* (RST 2020), est présentée, avec une application sur des données issues de la rade de Cherbourg (50). Celle-ci propose l'intégration des données géochimiques à l'intérieur d'un modèle de géostatistique afin d'obtenir des gradients de concentration, en s'affranchissant des problèmes liés aux paramètres granulométriques. Cette nouvelle méthodologie permet l'observation, à échelle fine, des processus de transport sédimentaires ainsi que l'identification des sources, par une approche statistique robuste et non-subjective.

Mots-Clés : géostatistique, transport sédimentaire, géochimie élémentaire



Mechanism of formation, mineralogy and geochemistry of the ooidal

Iron stone of Djebel Had, northeast Algeria

HamidaDiab*

Laboratory of Geodynamics and Natural Resources-LGRN – Badji Mokhtar University, National Company of Iron Mines SOMIFER, Tebessa, Algeria

The Djebel Had Ironstone (DHIS), an eight-meter thick stratiform sedimentary iron formation, forms part of the important mining district of south Tebessa, in northeastern Algeria. Stratigraphic, lithological, structural and metallogenic similarities, suggest the DHIS may extend further into southwestern Tunisia. We show that mineralization occurs as layers of ooidal ironstones and inter-laminated iron marl within mid-Eocene gypsiferous marls. The more or less rounded 0.1-2.0 mm brownish-blackish ooids, are composed of goethite, limonite, hematite, with traces of magnetite and piemontite. The grains display a smooth outer surface bound by an argilo-ferruginous layer embedded in siliceous-calcite cement. They are unusually friable, crumbling at the slightest shock. A high total iron (FeT) content of 50.12%, is dominated by up to 71.06% iron hydroxide (FeO(OH)). Much of the iron is present as goethite, a common feature of iron-rich ooids of North African origin. However, the lack of prominent chlorite minerals suggest the DHIS is not of a detrital origin. Instead, a negligible Ti and Al oxide concentration suggest a chemical provenance for the DHIS. The data suggest that ferruginous conditions developed in a potentially restricted/semi-restricted continental shelf margin where seafloor redox was sensitive to the alternating cycles of sea level change. We propose a new mechanism for the formation of ooidal ironstones, associated with shelf surface water eutrophication, bottom water anoxia promoted by sea level rise and the weathering of iron phosphate-rich rocks. Phosphorus and cerium enrichment, coupled to reconstructed redox depositional conditions and sediment mineralogy, suggest that intense biomass production stimulated the deoxygenation of shelf bottom waters and the deposition of the DHIS beneath a ferruginous water column.

Key words: Redox; weathering, iron formation; mid-Eocene; Tebessa; North Africa



Le maërl comme marqueur bio-sédimentaire de l'évolution des environnements littoraux à l'Holocène terminal

Axel Ehrhold ^{*1}, Gwenaél Jouet ¹, Jacques Grall ², Pascal Le Roy ³, Stéphan Jorry ¹,
Clément Lambert ³, Aurélie Penaud ³, Murielle Vidal ³,
Gwendoline Grégoire ⁴, Angélique Roubi ¹

¹IFREMER - Géosciences Marines – Laboratoire Géodynamique et enregistrement sédimentaire - France

²UBO – IUEM – UMS 3113 - Laboratoire des sciences de l'environnement marin - France

³UBO – IUEM - UMR 6538 - Laboratoire Géosciences Océan - France

⁴CNAM – INTECHMER - Laboratoire universitaire des sciences appliquées de Cherbourg - France

La reconstitution stratigraphique des dépôts de comblement de la Rade de Brest lors du dernier stade interglaciaire (Grégoire *et al.*, 2017), a permis d'identifier la succession des cortèges sédimentaires et les grandes étapes de l'évolution paléo-environnementale de cette baie depuis le Mésolithique (environ 9000 ans cal. BP). La Rade de Brest est une baie macrotidale semi-fermée alimentée par deux estuaires (Aulne et Elorn) dont la superficie des petits fonds n'excédant pas 10 m de profondeur, représente 47% de la surface totale. Son plan d'eau est protégé des grandes houles océaniques par l'étroit goulet qui donne sur la mer d'Iroise. Une analyse plus détaillée de la séquence sédimentaire rattachée au haut niveau marin (HST) à partir de 3000 ans cal. BP (Ehrhold *et al.*, *soumis*), montre l'interstratification de taphocoenoses d'algues corallinacées (maërl), que l'on retrouve encore aujourd'hui, vivant librement sur les petits-fonds. Les niveaux fossiles de maërl alternent avec le sédiment argilo-silteux estuarien et des horizons pluricentimétriques de dépôts grossiers (soit sableux ou très coquilliers) communs à toute la baie.

La synthèse de 43 carottes prélevées entre 2 et 15m de profondeur tout le long du littoral de la Rade et calées temporellement par 90 datations au ¹⁴C, a permis de mettre en évidence sur l'ensemble de la zone, la succession de plusieurs épisodes climatiques et anthropiques majeurs dans l'évolution de la sédimentation marine de ce système sur les 3000 dernières années. La croissance des bancs de maërl, de l'ordre de 1 à 2,1 m.ky⁻¹, suppose des conditions écologiques très spécifiques (Dutertre *et al.*, 2015). Leur évolution dans ce contexte montre la capacité ou les difficultés de ces algues mélobésiés à s'adapter rapidement aux changements brusques de leur environnement ou sur de plus longues périodes. Plus largement, la construction des bancs de maërl sur les côtes bretonnes semble se manifester sur des chronologies et des morphologies différentes en lien avec l'héritage morphologique et les conditions hydrodynamiques des régions qui ont accompagné la dernière remontée du niveau marin. *In fine*, le maërl s'avère être d'excellents marqueurs de la dynamique sédimentaire littorale, et son évolution depuis plusieurs milliers d'années permet d'envisager le devenir de ces écosystèmes dans le prochain siècle.

Dutertre, M., Grall, J., Ehrhold, A., Hamon, D., 2015. Environmental factors affecting maërl bed structure in Brittany (France). *European Journal Of Phycology* 50 (4), 371-383.

Grégoire, G., Le Roy, P., Ehrhold, A., Jouet, G., Garlan, T., 2017. Control factors of Holocene sedimentary infilling in a semi-closed tidal estuarine-like system: the bay of Brest (France). *Marine Geology* 385, 84-100.

Mots-Clés : Rade de Brest, taphocoenoses, rhodolithes, dynamique sédimentaire, paléo-tempêtes, déforestation



Modèle conceptuel du développement de la Langue de Barbarie (Sénégal), à partir d'images Sentinel2

Thierry Garlan^{*1}, Isabelle Gabelotaud¹, Erwin Bergsma², Rafael Almar³

¹ SHOM – Dpt Géologie Marine - France

² CNES-LEGOS – France

³ IRD-LEGOS – France

La Langue de Barbarie est un sujet d'étude depuis plusieurs décennies parce que cette pointe sableuse présente une dynamique ayant un impact sur les inondations et l'érosion de la ville de Saint-Louis. Des études nombreuses concernent également l'impact de la pénétration du coin salé dans l'estuaire et les difficultés de navigation pour les dizaines de bateaux de pêches traversant chaque jour l'estuaire et dont le transit s'accroît à cause l'allongement de la pointe. L'ouverture d'une brèche au sud de la ville de Saint-Louis du Sénégal, en octobre 2003, a modifié le cours du fleuve Sénégal, raccourcissant cette pointe sableuse d'un tronçon de 23 km. La Langue de Barbarie a repris sa progression vers le sud et présente depuis lors une dynamique sédimentaire exceptionnelle. En complément des travaux de terrain menés en 2017, 2019 et 2020 dans le cadre de l'ANR COASTVAR et du projet MEPELS, l'analyse d'une trentaine d'images parmi la série des 305 images du satellite Sentinel2 permet l'étude de l'évolution de l'extrémité de cette pointe sableuse sur la période d'août 2015 à mars 2020.

L'analyse de ces données met en évidence une croissance moyenne journalière supérieure à 500m². Elle permet également de suivre les processus de développement de la pointe avec l'apparition de pointes adventives, qui se développent côté mer le long de la pointe précédente, avant de pivoter vers l'intérieur du fleuve, permettant alors le comblement de la partie interne. Cette accrétion dont l'origine semble totalement due au transit littoral n'est pas continue et présente même des phases érosives du versant estuarien durant la période estivale des crues. Côté maritime, une érosion côtière est également observée localement. Enfin, ces dernières années présentent un autre signal moins bien caractérisé, car développé sur le plus long terme, et qui pourrait provenir d'une modification du régime du transit littoral.

Mots-Clés : Dynamique sédimentaire, transit littoral, sand spit, Sénégal, Langue de Barbarie, image satellite



Caractérisation des sources et de la dynamique sédimentaires d'une zone intertidale (Baie de Tatihou – France)

Gwendoline Grégoire^{1,2*}, Claire Marion^{1,2}, Anne Murat^{1,2}, Yann Méar^{1,2}, Emmanuel Poizot^{1,2}, Sandric Lesourd³

¹Conservatoire National des Arts et Métiers. INTECHMER, 50100 Cherbourg, France

²Normandie Univ, UNICAEN, Laboratoire des Sciences Appliquées de Cherbourg, EA 4253, 50100 Cherbourg, France

³ Normandie Univ, UNICAEN, CNRS, M2C, 14000 Caen, France

Dans le contexte actuel de changement climatique, les zones intertidales sont plus que jamais fragilisées par l'évolution des agents hydrodynamiques (marée, houle et fleuve). Pour comprendre ces modifications, plus de 200 échantillons sédimentaires, espacés chacun de 100 m, ont été prélevés dans la zone intertidale se développant entre l'estuaire de la Saire et l'île de Tatihou (Manche – France). Ce secteur est caractérisé par une importante diversité sur plusieurs aspects (géologiques, écologiques et archéologiques) et soumis à des activités anthropiques (aquaculture et tourisme) en développement. Une étude couplant l'analyse des corps sédimentaires, à partir de données LiDAR, et de mesures granulométriques (granulomètre laser) et géochimiques (fluorescence X) ont permis de caractériser la dynamique complexe de la zone et les différentes sources sédimentaires. La précision du maillage, est suffisante pour subdiviser la zone en plusieurs parties selon la source des particules et les agents hydrodynamiques dominants. Au centre de la zone, une couverture sableuse modelée en dunes de différentes morphologies est issue du démantèlement du platier rocheux granitique, les particules étant apportées par les houles à dominance Nord- Est. Les secteurs nord et sud sont chenalisés, les sédiments grossiers y sont mélangés à des particules fines riches en Titane et Manganèse, à l'image des sédiments fluviaux continentaux de la Saire. Cette signature continentale est présente également dans l'estuaire. Les particules fines proviennent du drainage fluvial des roches sédimentaires du bassin versant de la Saire et sont redistribuées par les courants de marée dans l'estuaire et les chenaux. L'observation des orthophotographies aériennes entre 1950 et 2019 montre un recul progressif de la zone estuarienne au profit de la zone centrale sableuse et suggère ainsi un déclin des apports continentaux et une prédominance de plus en plus forte des apports marins.

Mots-Clés : dynamique sédimentaire ; source ; fluorescence X ; géochimie ; granulométrie ; morphologie



Analyse de l'évolution des dynamiques et des stocks sédimentaires subtidaux depuis le XIXème siècle au large des côtes de Normandie (NW France)

Elise Grenard-Grand^{1*}, Justine Ponsolle², Sophie Le Bot², Bernadette Tessier¹.

¹ Morphodynamique Continentale et Côtière, Université de Normandie, CNRS, Caen 14000, France

² Morphodynamique Continentale et Côtière, Université de Normandie, CNRS, Rouen 76000, France

En Manche, la succession de cycles climatiques quaternaires est à l'origine du développement d'un stock sédimentaire localement conséquent, repris et façonné tel qu'on le connaît aujourd'hui dans le domaine côtier au cours de la dernière transgression. La partie subtidale du prisme sédimentaire littoral reste peu étudiée, à l'exception zones ponctuelles présentant des structures notables. Cette étude propose : (I) l'analyse des variations du stock sédimentaire côtier, au cours des deux derniers siècles, sur la base des variations bathymétriques des fonds marins, et (II) la mise en relation de ces variations avec l'évolution du trait de côte.

Les données bathymétriques disponibles étant très disparates, deux approches ont été réalisées : (1) la comparaison des données récentes (dernières décennies) permettent une étude précise des mouvements de surface, via la dynamique des dunes. Trois marqueurs propres à ce type de dynamique sont utilisés : la polarité des dunes, leur migration entre deux levés bathymétriques et les flux sédimentaires charriés, estimés via la méthode « *Dune Tracking* » à partir de la vitesse de migration et de divers paramètres morphologiques. (2) Pour les données de bathymétrie anciennes (data.shom), une première étape d'interpolation est nécessaire. Malgré des couvertures géographiques et temporelles variables entre les différents levés, des différentiels bathymétriques peuvent être réalisés dans les zones de superposition. Cette méthode met en évidence les zones en accrétion et en érosion et plus globalement les volumes mis en jeu entre deux dates. La mobilité sédimentaire subtidale est ensuite mise en relation avec l'évolution du trait de côte afin d'appréhender le synchronisme des évolutions à l'échelle régionale et discuter leur origine, locale ou globale. La finalité de ces travaux est de dégager des tendances spatio-temporelles de la dynamique sédimentaire côtière, à l'échelle des trois façades maritimes de Normandie et au cours des deux derniers siècles.

Mots-Clés : dynamique sédimentaire, bathymétrie, tendances régionales, tendances historiques, flux sédimentaire, différentiels bathymétriques.



Le disponible sédimentaire subtidal du prisme littoral de Normandie. Distribution et caractérisation par sismique réflexion.

Elise Grenard-Grand^{1*}, Bernadette Tessier¹, Sophie Le Bot².

¹ Morphodynamique Continentale et Côtière, Université de Normandie, CNRS, Caen 14000, France

² Morphodynamique Continentale et Côtière, Université de Normandie, CNRS, Rouen 76000, France

Dans le contexte actuel du changement global, les littoraux sableux constituent des environnements vulnérables. Un grand nombre de travaux s'intéressent à travers le monde au problème de leur érosion mais peu considèrent leur évolution à l'échelle du prisme côtier dans son ensemble, prenant en compte les stocks sableux accumulés dans l'avant-côte disponibles pour l'alimentation des plages.

Cette étude, réalisée à l'échelle des côtes normandes, cible les zones de l'avant-côte et du domaine subtidal pouvant disposer de ressources sédimentaires. L'accent est principalement mis sur : (1) l'estimation des volumes sédimentaires au sein des prismes et potentiellement mobilisables pour l'alimentation du littoral, et (2) la dynamique de mise en place des prismes.

Les données de sismique réflexion permettent d'une part de quantifier la distribution spatiale des dépôts de sables en termes d'épaisseur et de volume, et d'autre part d'identifier les différentes étapes de constitution du prisme côtier. Le prisme est ainsi divisé en quatre unités stratigraphiques relatives aux dynamiques de transgression et de haut niveau marin de l'Holocène.

Les deux unités basales (1 et 2) sont reconnues dans le remplissage des paléovallées ; l'unité 3 recouvre l'ensemble du domaine subtidal ; l'unité 4 est majoritairement constituée de structures hydrosédimentaires ponctuelles, telles que les bancs sableux et les dunes. En l'absence de l'unité sommitale (unité 4), le fond marin est localement mais régulièrement érosif, illustrant le remaniement de l'unité 3, participant à la construction de l'unité 4.

L'absence de carottes sédimentaires dans les zones de dépôts ne permet pas une réelle caractérisation de ces stocks sableux. Cependant l'interprétation des faciès sismiques couplée avec l'architecture interne des dépôts et la connaissance des structures hydrosédimentaires permettent de déterminer les zones voire les unités sédimentaires potentiellement mobiles.

Mots-Clés : disponible sédimentaire, stratigraphie sismique, prisme sédimentaire côtier, sismique réflexion, isopaques.



L'analyse élémentaire des fractions sableuses : une clé pour tracer les sources des sables littoraux

Anne Murat^{*1,2}, Gwendoline Grégoire^{1,2}, Célestin Desgué^{1,2}, Alissia Rieux^{1,2}, Bastien Peuziat^{3,4}, Noémie Baux^{1,2}, Yann Méar^{1,2}, Emmanuel Poizot^{1,2}, Stéphane Costa³, Anne Duperret⁵, Bernadette Tessier⁴ et Sandric Lesourd⁴

¹Conservatoire National des Arts et Métiers. INTECHMER, France

²Normandie Univ, UNICAEN, Laboratoire des Sciences Appliquées de Cherbourg, EA 4253, France

³Normandie Univ, UNICAEN, CNRS, LETG, France

⁴Normandie Univ, UNICAEN, CNRS, M2C, France

⁵Normandie Univ, UNILEHAVRE, CNRS, UMR 6294 LOMC, France

Le traçage des sources des particules sédimentaires est généralement effectué à travers une approche géochimique utilisant des outils tels que la fluorescence X (XRF). Ces analyses sont aujourd'hui devenues incontournables pour définir, par exemple, l'évolution temporelle des environnements de dépôt. Elles sont alors directement réalisées sur les carottes sédimentaires mais seulement sur les niveaux silto-argileux, et les résultats restent semi-quantitatifs. L'application de cette technique aux sables est impossible car seuls des grains fins peuvent être analysés par fluorescence X. Pour obtenir une analyse quantitative des dépôts sableux, nous avons développé une méthodologie sur échantillons secs broyés qui permet d'éliminer l'imprécision liée à la présence d'eau et à une granulométrie hétérogène.

Sur de nombreux littoraux ouverts aux houles, les sédiments transportés et déposés sont essentiellement composés de sables ou de graviers. Cette nouvelle approche permet ainsi de pallier le manque d'informations lié à une granulométrie trop grossière et d'investiguer avec des outils géochimiques des zones littorales qui manquent de traceurs des sources et du transport sédimentaire.

Cette méthodologie est actuellement en test sur la zone intertidale du Cap de la Hève au Tréport (post doctorat d'A. Rieux et thèse de B. Peuziat). Les fractions granulométriques d'un même échantillon montrent des compositions chimiques différentes claires et apportent des informations sur l'origine des grains et *in fine* leur source. Certaines fractions sont très homogènes le long du littoral alors que d'autres peuvent être très liées à des sources localisées. Nous souhaiterions étendre cette approche analytique à l'ensemble des littoraux sableux français en recherchant des collaborations.

Mots-clés : sables littoraux ; géochimie élémentaire ; sources ; fluorescence X



Numerical modeling of tidal evolution in Brest bay over the Holocene: How hydrodynamics can help us to understand sediment geological distribution?

Matthieu Olivier ^{*1,2}, Estelle Leroux ¹, Didier Granjeon ², Marina Rabineau ³, Pierre Le Hir ¹, Héloïse Muller ¹

¹ IFREMER – Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer - France

² IFPEN – Institut Français du Pétrole et Energie Nouvelles - France

³ IUEM – Institut Universitaire Européen de la Mer- France

L'influence de la marée sur les sédiments a été identifiée depuis les débuts de la sédimentologie de faciès, mais à ce jour son impact sur les sédiments reste complexe à comprendre et à modéliser sur de longues périodes (milliers à millions d'années). En raison des difficultés d'accès aux données sous les mers, la modélisation a pris de plus en plus d'importance dans la compréhension des dépôts marins. Deux principales manières de reproduire numériquement la sédimentation ont été mises en place: les modèles stratigraphiques et hydrosédimentaires. Ces premiers ne s'attachent pas à modéliser chaque processus, mais leurs effets cumulés sur l'architecture stratigraphique. L'aggrégation des effets cumulés directement sur la dynamique sédimentaire permet d'atteindre des échelles de temps d'intérêt géologique (millions d'années), mais ne peut prendre en compte des phénomènes oscillants rapidement tels que la marée. Les modèles hydrosédimentaires sont basés sur la résolution des processus physiques. Ces modèles ont une grande résolution spatiale et temporelle, mais le calcul de certains processus impose des pas de temps très courts (secondes).

Pour étudier l'influence de la marée sur des durées intermédiaires (milliers d'années), nous proposons une méthode interdisciplinaire mêlant la sédimentologie, la physique et la modélisation numérique. Cette méthode a été testée pour la période Holocène en Rade de Brest (France). Faute de pouvoir modéliser finement la marée sur toute la durée de l'Holocène, il a été nécessaire de définir des scénarios, ou étapes clés du remplissage, en reconstituant les paléoenvironnements (niveau marin, bathymétrie). Chaque scénario a été reconstruit et modélisé à l'aide du modèle hydro-sédimentaire MARS3D/MUSTANG. Les résultats seront ensuite introduits en entrée du modèle stratigraphique pour une simulation continue sur les derniers 9 000 ans.

Les sorties hydro-sédimentaires mettent en avant des variations de la circulation tidal en réponse à la morphologie du fond et à la montée du niveau marin. La sédimentation associée à chaque scénario a été simulée et corrélée aux enregistrements sédimentaires. Ces résultats révèlent, entre les scénarios, des différences importantes de quantités et granulométries sédimentaires déposées sur les différents domaines morphologiques.

Mots-Clés : Marée, sédiment, courants, accrétion, érosion, modélisation hydrodynamique, modélisation stratigraphique



MSTA: a GIS tool for proxy analysis

Emmanuel Poizot^{*1,2}, Anne Murat^{1,2}, Noémie Baux^{1,2}, Gwendoline Grégoire^{1,2}, Yann Méar^{1,2}

¹Conservatoire National des Arts et Métiers. INTECHMER, France

²Normandie Univ, UNICAEN, Laboratoire des Sciences Appliquées de Cherbourg, EA 4253, France

A large numbers of works aims to address the question of sediment movements through different approaches, from classical field observations to numerical modelling of particle motion. Between the two, McLaren (1981) defined the so-called sediment trend analysis (STA®) method using three descriptive granulometric parameters, *i.e.* the mean grain size (m), the sorting (s) and the skewness (g). Transport vector fields are defined based on the comparison of parameters between samples along predefined lines (one dimensional approach, 1D). On the same base, Gao and Collins (1992) defined the grain size trend analysis (GSTA) which take into account surrounding samples (two-dimensional approach, 2D). Poizot et al. (2006) and Poizot et al. (2008) proposed enhancements of the GSTA method, in particular through the use of a geostatistical approach to better highlight the spatial characteristics of the studied parameters. Despite successive improvements (Poizot & Méar, 2008 ; Poizot & Méar, 2010), there are still works indicating discrepancies between GSTA results and field observations or measurements. We proposed (Baux et al., submit) to use three geochemical parameters (TOC, Ca and Si) in a GSTA like approach in order to infer sediment movements in a relative complex area off the Seine river estuary (mixed sediments of various origin, several hydrodynamic agents, high anthropic pressure). On the objective of a generalisation of this approach to an almost unlimited number of variables, we have developed the Multi-proxy Sediment Trend Analysis (MSTA) application, embedded in the QGIS software. Through a case study based on a data set sampled off the Orne estuary (Normandy, France), we propose to highlight profits of the MSTA approach in the determination of the true sediment transport.

Keywords : geographical information system, Python, plugging, sediment, transport, vector field

McLaren, P. An interpretation of trends in grain size measures *Journal of Sedimentary Petrology*, 1981, 51, 611-624

Gao, S. & Collins, M. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors" *Sedimentary Geology*, 1992, 80, 47-60

Poizot, E.; Méar, Y.; Thomas, M. & Garnaud, S. The application of geostatistics in defining the characteristic distance for grain size trend analysis *Computers & Geosciences*, 2006, 32, 360 – 370

Poizot, E.; Méar, Y. & Biscara, L. Sediment Trend Analysis through the variation of granulometric parameters: A review of theories and applications *Earth-Science Reviews*, 2008, 86, 15-41

Poizot, E. & Méar, Y. eCSedtrend: A new software to improve sediment trend analysis *Computers & Geosciences*, 2008, 34, 827 – 837

Poizot, E. & Méar, Y. Using a GIS to enhance grain size trend analysis *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25, 513 – 525

Baux, N. ; Murat, A.; Poizot, E.; Méar, Y. ; Gregoire, G.; Lesourd, S.; Dauvin, J.C. An innovative Geostatistical Sediment Trend Analysis using geochemical data to highlight sediment sources and transport, 2020, soumis à *Environmental Research*



²Intervenant

Architecture interne de barrières littorales graveleuses en environnement hypertidal (mer de la Manche et Patagonie Argentine) : une étude par prospection géoradar

Léo Pancrazzi ^{*1}, Bernadette Tessier ¹, Pierre Weill ¹, Dominique Mouazé ¹, José Cuitiño ², Maria Duperron ³, Roberto Scasso ³

¹ Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C), Université de Caen Normandie – France

² CONICET, Puerto Madryn – Argentine

³ University of Buenos Aires – Argentine

Les flèches littorales et les beach ridges sont des barrières littorales principalement contrôlées par une dynamique de vagues. Les structures qui les composent reflètent les différentes orientations du transport net de sédiments (longshore vs. cross-shore). En domaine hypertidal, les forts marnages induisent de grandes variations du niveau d'eau, ainsi que de forts courants tidaux qui s'ajoutent à l'action des vagues. L'objectif de cette étude est d'identifier les caractères stratigraphiques et morphologiques communs à deux systèmes de barrières littorales en environnement hypertidal, et d'identifier les variabilités relatives à leur exposition aux forçages de houle ou de marée. Pour répondre à cette problématique, deux barrières littorales sont prospectées : la flèche littorale de l'estuaire de la Somme (Nord de la France), et les systèmes de barrières de l'estuaire du Santa Cruz en Patagonie (Sud de l'Argentine). Les marnages maximums sont de 9 et 11 m en France et en Argentine respectivement. Les deux sites ont fait l'objet d'une prospection au géoradar (400 MHz GPR GSSI), complétée par une analyse d'images aériennes et de modèles numériques de terrain. Les profils GPR (pénétration 2 à 4 mètres) montrent une grande variabilité de faciès associés à des surfaces d'érosion, à la progradation du profil de plage, à l'élongation par le courant de dérive, aux crochons et au développement de l'extrémité des flèches, et aux dépôts de débordement. Les systèmes de barrières qui sont le plus ouverts à la mer (embouchure externe Somme et Santa Cruz) montrent un développement classique contrôlé par la dérive littorale liée aux vagues, probablement renforcée par les courants estuariens parallèles à la côte. Les systèmes plus internes (embouchure interne Santa Cruz), montrent des morphologies, des structures et des directions d'élongation contrastées (seaward ou landward) reflétant un équilibre plus complexe entre la dynamique des vagues et la dynamique (fluvio) tidale.

Mots-Clés : barrière littorale, galets, hypertidal, géoradar, stratigraphie, Patagonie, Manche



Analyse combinée de l'évolution morphologique et de l'architecture interne d'une flèche littorale mixte sablo-graveleuse active (baie de Somme, France)

Léo Pancrazzi ^{*1}, Pierre Weill ¹, Bernadette Tessier ¹, Sophie Le Bot ², Laurent Benoît ¹,
Dominique Mouazé ¹

¹ Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C), Université de Caen Normandie – France

² Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C), Université de Rouen Normandie – France

La compréhension de la morphodynamique des barrières littorales, et de son archivage dans l'architecture des corps sédimentaires recèle encore de nombreuses incertitudes. Les flèches sédimentaires se prêtent particulièrement bien à cette analyse en raison d'un fort potentiel de préservation lié à leur élongation rapide sous l'action de la dérive littorale. Si de nombreux travaux se sont penchés sur la question des flèches sableuses, il n'en est pas de même pour leurs équivalents graveleux. Cette étude se focalise sur la caractérisation de l'architecture sédimentaire d'une flèche littorale mixte sablo-graveleuse, en relation avec son évolution morphologique pluri-décennale. Pour se faire, une prospection au géoradar (GPR GSSI 400 MHZ) a été menée sur la flèche de La Mollière, qui s'intègre dans la grande barrière de la baie de Somme. L'histoire de ce corps sédimentaire unique en France métropolitaine débute dans les années 1940. La flèche s'étend sur environ 5 km et est constituée d'une multitude de cordons et de crochons. Les résultats permettent de proposer un modèle synthétique de dépôt et d'architecture stratigraphique spécifique aux flèches de galets avec trois unités "morpho-sédimentaires" : L'Unité 1, située à la racine de la flèche. Elle se caractérise par des structures principalement progradantes : L'Unité 2, dans la partie intermédiaire, constituée de cordons bien distincts comprenant un noyau au sommet duquel se surimpose une structure aggradante associée à une dynamique dominante cross-shore : L'Unité 3, à l'extrémité de la flèche, où l'élongation des cordons est fortement impactée par la dynamique des bancs sableux et le développement de la plateforme sableuse. Une prospection géoradar plus étendue permettrait de mieux comprendre comment ces flèches littorales à développement rapide (quelques décennies à siècles) s'intègrent dans la dynamique de construction de la grande barrière de la baie de Somme à une échelle plurimillénaire.

Mots-Clés : flèche littorale, galets, morphodynamique, géoradar, stratigraphie, baie de Somme, washover, berme



Ensablement de la plate-forme d'érosion marine du littoral à falaises de Seine Maritime : analyse historique et origine

Bastien Peuziat^{1,2 *}, Stéphane Costa¹, Bernadette Tessier², Anne Murat^{3,4},
Gwendoline Gregoire^{3,4}, Alissia Rieux²

¹Normandie Univ, UNICAEN, CNRS, LETG, 14000 Caen, France

²Normandie Univ, UNICAEN, CNRS, M2C, 14000 Caen, France

³Conservatoire National des Arts et Métiers. INTECHMER, 50100 Cherbourg, France

⁴Normandie Univ, UNICAEN, Laboratoire des Sciences Appliquées de Cherbourg, EA 4253, 50100 Cherbourg, France

Au contact de la Manche Orientale, le littoral de Seine-Maritime (Normandie) se caractérise par d'imposantes falaises crayeuses, au pied desquelles se développe une plateforme d'érosion marine à faible pente, localement surmontée par un cordon de galets de silex.

Les platiers rocheux sont localement recouverts de formations superficielles sableuses se présentant sous deux formes : (1) des étendues sableuses pérennes, d'épaisseur métrique à pluri-métrique, masquant légèrement les paléo-chenaux inscrits sur le platier ; (2) des placages d'épaisseur décimétrique à métrique transitant parallèlement au rivage vers le NE, sous l'action des courants de marée et des houles de quadrant ouest.

La présence de ces formations sableuses a toujours été observée. Néanmoins, ces formations semblent depuis peu se développer considérablement spatialement. L'objectif de cette étude est de mettre en évidence ce phénomène d'ensablement et d'en définir les causes et l'origine des sables.

La méthodologie utilisée couple une approche historique, basée sur l'étude diachronique de l'évolution surfacique des ensablements intertidaux depuis 1966 par le biais de photographies aériennes verticales, et une approche analytique s'appuyant sur l'analyse granulométrique et de géochimie particulière (fluorescence X), de 57 échantillons prélevés sur 17 sites du littoral de Seine-Maritime.

Les résultats par photo-interprétation montrent un ensablement massif et continu du platier rocheux depuis les années 1960, avec toutefois une évolution distincte de part et d'autre de Saint-Valéry-en-Caux. Les analyses des échantillons mettent en évidence plusieurs gradients géochimiques en fonction du profil de plage mais également de la taille des grains. L'ensemble des résultats semble indiquer une origine subtidale pour ces sables. Des modélisations numériques des transports sédimentaires seront réalisées pour confirmer cette hypothèse.

Mots-Clés : ensablement, zone intertidale, évolution surfacique historique, granulométrie, XRF



L'érosion des côtes rocheuses comme source significative de sédiments vers les océans

Vincent Regard ^{*1}, Mélody Prémaillon ¹, Thomas J. B. Dewez ², Sébastien Carretier¹, Catherine Jeandel ³, Yves Goddérès ¹, Stéphane Bonnet ¹, Jacques Schott¹, Kevin Pédaja ⁴, Joseph Martinod ⁵, Jérôme Viers ¹, Sébastien Fabre ⁶

¹ GET, Université de Toulouse, CNRS, UPS(OMP), IRD, CNES, Toulouse, France

² BRGM, Orléans, France.

³ LEGOS, Université de Toulouse, CNRS, UPS(OMP), IRD, CNES, Toulouse, France.

⁴ M2C, Normandie Univ, Unicaen, Unirouen, CNRS, M2C, Caen, France.

⁵ ISTerre, Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, Chambéry, France

⁶ IRAP, Université de Toulouse, CNRS, UPS(OMP), CNES, Toulouse, France

L'érosion des côtes rocheuses exporte vers l'océan des sédiments dont la quantité est mal connue (~0,15-0,4 Gt/a à l'échelle globale ; Mahowald et al. 2005). En réalité, l'export de sédiment depuis les côtes rocheuses peut être non négligeable : l'export sédimentaire de la côte d'Holderness (64 km, NE de l'Angleterre) est comparable à celui du Rhône (~10 Mt/a). Dans ce travail, nous quantifions l'apport sédimentaire des côtes rocheuses à l'échelle européenne, le continent caractérisé par le meilleur jeu de données. Ce bilan nécessite la connaissance des longueurs, hauteurs et taux de recul des falaises. Le taux de recul des falaises est au premier ordre expliquée par la lithologie des falaises (Prémaillon et al. 2018) : Les taux de recul médians sont de 2,9, 10 et 23 cm/a respectivement pour les lithologies résistantes, intermédiaires et peu résistantes. Ces taux de recul ont ensuite été appliqués à la classification des côtes européennes (EMODnet), donnant la longueur relative des côtes pour des falaises de différents types de lithologie. La hauteur des falaises est extraite du MNT EU- DEM.

En raison de la disponibilité des données, nous n'avons travaillé que sur environ 70 % de l'ensemble de l'Europe (127 000 km de littoral dont 65 000 km de côte rocheuse), qui fournit 111±65 Mt/a de sédiment, ce qui correspond à 0,38 fois l'apport en sédiments des rivières sur la même zone (290 Gt/a sur 3,56 10⁶ km²), calculé d'après Milliman et Farnsworth (2011). Une extrapolation brute au littoral global (1,5 10⁶ km) évalue l'apport sédimentaire des côtes rocheuses à 0,6-2,4 Gt/a, soit un ordre de grandeur inférieur à celui des rivières (11-21 Gt/a, Milliman et Farnsworth, 2011).

Cette source sédimentaire, jusqu'à présent négligée, a des implications sur : (i) le bilan géochimique de l'océan ; (ii) le contrôle du niveau de la mer sur le taux de recul des falaises ; et (iii) les caractéristiques et la localisation des dépôts de sédiments sur les marges océaniques.

Mots-Clés : Érosion côtière ; source ; flux de matière ; côte rocheuse



Traçage comparé des sources des sables littoraux par l'analyse élémentaire de fractions granulométriques : application au littoral de Seine-Maritime

Alissia Rieux^{1,2,*}, Anne Murat^{1,2}, Gwendoline Grégoire^{1,2}, Bastien Peuziat^{3,4}, Yann Méar^{1,2}, Anne Duperret⁵, Stéphane Costa³

¹Conservatoire National des Arts et Métiers. INTECHMER, 50100 Cherbourg, France

²Normandie Univ, UNICAEN, Laboratoire des Sciences Appliquées de Cherbourg, EA 4253, 50100 Cherbourg, France

³Normandie Univ, UNICAEN, CNRS, LETG, 14000 Caen, France

⁴Normandie Univ, UNICAEN, CNRS, M2C, 14000 Caen, France

⁵Normandie Univ, UNILEHAVRE, CNRS, UMR6294 LOMC, 76600 Le Havre, France

Le littoral de Seine Maritime se caractérise par un ensemble de falaise de craie du Crétacé supérieur surplombant une plateforme d'érosion marine à faible pente recouverte d'argile, de sable et d'un cordon de galets de silex. L'origine de la fraction sableuse littorale et subtidale le long de ce littoral est encore mal connue. L'objectif général de cette étude est de caractériser les sources des fractions sableuses et de les identifier dans les dépôts sédimentaires marins. L'approche utilisée pour répondre à cette problématique correspond à une caractérisation géochimique comparative (analyse élémentaire par fluorescence X) des sables marins, littoraux et en falaise pour discerner les stocks issus de l'érosion directe des falaises (sables ferrugineux aptiens et craie glauconieuse cénomaniennne). Des marqueurs source des différentes lithologies sont identifiés afin de les tracer dans les sables en transit sur l'estran de part et d'autre du cap d'Antifer, en fonction de la fraction granulométrique. Cette étude a été effectuée sur les sables de bas estran provenant de 18 plages entre le Cap de la Hève et le Tréport. Les échantillons ont tout d'abord été tamisés entre 0,05 et 2 mm, chaque fraction granulométrique a ensuite été broyée et analysée par fluorescence X (XRF). Les premiers résultats montrent une variabilité géochimique à la fois entre les fractions d'un même échantillon et entre les différents sites pour la même fraction granulométrique. La variabilité géographique est plus importante pour les fractions les plus fines (50 à 100 microns) probablement plus variées d'un point de vue minéralogique. Le traçage des sources peut s'effectuer de manière indépendante sur chaque classe granulométrique sur la base d'éléments chimiques ou de rapports entre éléments caractéristiques. Il apporte des éléments pour l'interprétation de la dynamique sédimentaire régionale.

Mots-Clés : géochimie, sources, sables littoraux, bas estran, XRF, fractions granulométriques



Mise en cohérence des études hydrosédimentaires à l'échelle du Parc Naturel Marin Estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis (projet CELHYSE).

Schmitt Anaïs^{*1}; Chaumillon Eric¹

Affiliation : 1 Littoral ENvironnement et Société, Université de La Rochelle, France.

Le Parc Naturel Marin de l'Estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis présente un espace avec des richesses naturelles remarquables et fragiles ainsi que de multiples activités (conchyliculture, tourisme, pêche, extractions de granulats...) aux forts enjeux socio- économiques.

Ce parc se caractérise par une grande complexité géomorphologique, avec des côtes très découpées, rocheuses, sableuses et vaseuses, dominées par les vagues, par les marées et mixtes. Il est très vulnérable aux submersions marines en raison d'une forte proportion de zones rétro littorales situées sous le niveau des plus hautes mers astronomiques. Les dynamiques sédimentaires y sont exceptionnelles, avec des migrations du trait de côte pouvant dépasser 20 m/an. Face à ces enjeux et cette complexité, une synthèse de connaissances des dynamiques hydrosédimentaire à l'échelle du parc est incontournable comme outil de gestion, mais également pour mettre en cohérence les nombreuses connaissances scientifiques produites lors des 2 à 3 dernières décennies.

Quatre vallées incisées expliquent la géomorphologie générale. Elles présentent chacune une juxtaposition entre deux dépôts centres, un dans l'avant-côte et un prisme littoral, séparés par une zone d'embouchure avec une couverture sédimentaire faible à absente. Dans les domaines estuariens abrités, une régression millénaire rapide se maintient sur les échelles de temps plus courtes, amplifiée par la poldérisation. Dans les domaines exposés aux vagues, l'érosion domine. A la transition entre ces deux domaines, les dynamiques sont exacerbées, avec des embouchures, des flèches sableuses et leurs côtes adjacentes très mobiles. Outre le contrôle par les vagues et les marées, l'influence de l'héritage géologique est cruciale. A l'échelle événementielle, les tempêtes et clusters de tempêtes ont des impacts morphogènes considérables. Le changement climatique et la multiplicité des paramètres de contrôle de ces dynamiques rendent hasardeuses les prédictions d'évolutions. Néanmoins, dans un contexte d'élévation du niveau de la mer, le recul important des barrières et les submersions massives récentes questionnent le maintien des dynamiques sédimentaires d'avant-plage, le bon état écologique des habitats marin qui sont un des objectifs de gestion du parc.

Mots-Clés : Dynamique sédimentaire ; système mixte ; héritage ; gestion

Les plateformes rocheuses sous-marines de Normandie : un



marqueur des paléo-rivages holocène et de l'accélération de l'érosion côtière des falaises de craie

Anne Duperret^{*1}, Timothée Duguet¹, Stéphane Costa², Vincent Regard³, Grégoire Maillet⁴

¹ Normandie Univ, UNILEHAVRE, CNRS, UMR 6294 LOMC, 76600 Le Havre, France

² Normandie Univ, UNICAEN, CNRS, UMR 6554 LETG-Caen, 14000 Caen, France

³ Université de Toulouse, GET, CNRS, IRD, UPS, CNES, 34000 Toulouse, France

⁴ Université d'Angers, CNRS, UMR 6112 LPG-Angers, 49000 Angers, France

Les plateformes rocheuses sous-marines nous donnent des informations cruciales sur la localisation des paléo-lignes de rivage et les variations passées du niveau marin. Elles sont susceptibles d'être utilisées pour estimer des taux d'érosion côtière sur le long-terme. Dans cette optique, les côtes à falaises de craie de Seine-Maritime (Normandie) ont été explorées à l'aide de la vedette haliotis (campagnes CROCOLIT 2013, SPLASHALIOT 2014, CROCOCAUX 2017), pour cartographier la plateforme littorale et sous-marine en zone très peu profonde et établir ainsi des MNT terre-mer de détail sur quatre secteurs côtiers à lithologies de craies variables.

Sur un linéaire de 120 km de littoral, les morphologies de plateformes sous-marines présentent une structuration uniforme, caractérisée par une plateforme interne de faible pente systématiquement limitée par un abrupt de 4 à 5 mètres, situé entre -9 et -10 m de profondeur (NGF) et se développant parallèlement à la position actuelle de la côte. Elle est prolongée par une plateforme rocheuse externe, qui apparaît localement entre -14 et -17 m de profondeur. Ces structures correspondent à des plateformes littorales sous-marines héritées, formées au cours d'un haut niveau marin. L'abrupt de bout de plateforme interne correspond à une paléo-position de falaise côtière, dont le début d'érosion a été daté à l'aide d'isotopes cosmogéniques du ^{10}Be à $6.5 \text{ kyr} \pm 1 \text{ ky}$.

Etant donné que les taux moyen d'érosion actuels des falaises de craie de Normandie sont estimés entre 0.10 et 0.18 m/an, d'après un calcul photogrammétrique sur une période de 42 ans. La position et la datation de l'abrupt de bout de plateforme interne permet de calculer un taux d'érosion côtière moyen sur 6500 ans. Ces taux varient de $0.051 \pm 0.008 \text{ m/an}$ à $0.090 \pm 0.014 \text{ m/an}$, selon les secteurs d'étude. Ils apparaissent comme 33 à 57% plus faibles que les taux d'érosion actuels. Ils démontrent donc une accélération contemporaine du taux d'érosion des falaises de craies de Normandie.

Mots-Clés : Littoral, craie, plateforme rocheuse, érosion, isotopes cosmogéniques



T8.2. Archives océaniques actuelles et subactuelles





Caractérisation de la composition des sables de dépôts contouritiques dans le Golfe de Cadix durant les périodes interglaciaires des derniers 410 ka sous l'influence de la Mediterranean Outflow Water

Juliette Girard^{*1}, Emmanuelle Ducassou¹, Paul Moal-Darrigade¹

¹Laboratoire Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (EPOC) -

France

A l'ouest du détroit de Gibraltar, le Golfe de Cadix subit l'influence de la *Mediterranean Outflow Water* (MOW), un courant sortant de la Méditerranée (300-1200 m) générant un système de dépôts contouritiques d'une grande extension. Ces dépôts présentent des taux de sédimentation importants et permettent d'étudier à haute résolution spatiale et temporelle la dynamique de la MOW, les échanges Atlantique-Méditerranée et les conditions paléoclimatiques en Méditerranée. Dans le but d'étudier les variations d'intensité et d'activité de la MOW, des forages ont été réalisés sur plusieurs sites lors de l'Expédition IODP 339, notamment dans le drift contouritique de Faro, au nord du Golfe de Cadix.

Pour mieux appréhender les variations hydrodynamiques de ce courant ainsi que les sources potentielles des sables concentrés dans ces dépôts contouritiques, cette étude s'est concentrée sur des séquences contouritiques des interglaciaires suivants : MIS1, 5, 9 et 11. Des analyses granulométriques, élémentaires (XRF) et calcimétriques ont été effectuées, ainsi qu'une étude de la pétrologie des sables. Les cortèges argileux ont également été comparés aux enregistrements.

Les sables des séquences contouritiques sont composés d'un mélange de particules carbonatées biogéniques, terrigènes silicoclastiques et authigènes. Les variations de composition ont permis de mettre en évidence des périodes d'intensification de la MOW et des périodes où les processus gravitaires et les apports fluviaux dominent et ainsi d'établir un modèle de composition des séquences contouritiques. La plupart des séquences contouritiques sont carbonatées (>30% de carbonates). La fraction >150µm est généralement dominée par les foraminifères avec des tests intacts (>50%) alors que la fraction 63-150 µm est plutôt dominée par les quartz. Lorsque la MOW est très active, les sédiments les plus fins sont vannés, masquant ainsi une partie du signal sédimentaire et constituant un enjeu supplémentaire pour la reconstruction des processus de sédimentation.

Mots-Clés : Golfe de Cadix, contourites, Mediterranean Outflow Water, périodes interglaciaires



Nouvelle lecture des phases de la dernière déglaciation dans le Loch Sunart (Nord-Ouest Ecosse) basée sur des traceurs géochimiques.

Anne Murat^{*1, 2}, Agnès Baltzer³, Yann Méar^{1, 2}, Zohra Mokeddem⁴, Florian Cesbron^{1, 2} et Anne-Véronique Walter-Simonnet⁵

¹ Conservatoire National des Arts et Métiers. INTECHMER, France

² Normandie Univ, UNICAEN, Laboratoire des Sciences Appliquées de Cherbourg, EA 4253, France

³ Univ. de Nantes, LETG-UMR6554, France

⁴ Univ. de Bretagne Occidentale, France

⁵ Univ. Bourgogne Franche-Comté, UMR 6249 Chrono-environnement, France

Les archives sédimentaires sont la clé de la reconstitution des paléoenvironnements. En zone côtière, les conditions d'énergie du milieu liées à la houle ou la marée sont souvent à l'origine de perturbations (remobilisation, érosion) du dépôt sédimentaire. Les sites où ces perturbations demeurent limitées sont rares. Les fjords, abrités des houles par des seuils, sont donc des zones particulièrement intéressantes pour obtenir des enregistrements de qualité.

Le Loch Sunart est situé sur la côte occidentale de l'Ecosse. Les dépôts prélevés dans le bassin le plus externe, par 38m de profondeur, ont été étudiés à travers plusieurs proxies : ¹⁴C, granulométrie, pollens, foraminifères benthiques dans un premier temps (Mokeddem *et al.*, 2010 ; Baltzer *et al.*, 2010) et, plus récemment, géochimie élémentaire (fluorescence X) qui permet d'affiner l'interprétation de certains épisodes.

L'enregistrement débute à la fin du dernier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans, quand le loch était encore recouvert par la glace et se termine à l'Actuel. L'approche géochimique permet de mettre en évidence des périodes de stabilité, d'évolution progressive et des événements de courte durée qui viennent faire basculer brutalement le loch dans des conditions environnementales particulières avec un développement extraordinaire de la vie marine.

Baltzer *et al.*, (2010). Combined pollen and acoustic seismic facies analyses: Evaluating climatically-driven changes in a Scottish sea loch (fjord) over the last 20,000 years. From: Howe, J. A., Austin, W. E. N., Forwick, M. & Paetzel, M. (eds) Fjord Systems and Archives. Geological Society, London, Special Publications, 344, 357–371.

Mokeddem *et al.* (2010). Multiproxy reconstruction of palaeoenvironmental evolution since the Last Glacial Maximum in a fjord environment : Loch Sunart (NW Scotland). From: Howe,

J. A., Austin, W. E. N., Forwick, M. & Paetzel, M. (eds) Fjord Systems and Archives. Geological Society, London, Special Publications, 344, 343–355.

Mots-Clés : archives sédimentaires ; loch ; stabilité ; instabilités et évolution progressive en paléoenvironnement ; géochimie élémentaire



Contribution du compartiment sédimentaire à la demande en oxygène dissous durant un évènement hypoxique dans l'estuaire de la Loire (France)

Hulot Vivien ¹, Maillet Grégoire* ¹, Schmidt Sabine ², Deflandre Bruno ², Savoye Nicolas ²
Metzger Edouard¹

¹ UMR 6112 LPG BIAF, Univ. Angers, Univ. Nantes, CNRS, Angers, France

² UMR5805 EPOC, CNRS, OASU, Université de Bordeaux, Pessac, France

En 2021, l'estuaire de la Loire est encore le site d'épisodes hypoxiques récurrents qui, notamment, ont pour conséquence de déclasser la masse d'eau au titre de la D.C.E.. Une particularité de cet estuaire, qui pourrait expliquer cette originalité, est la quantité de sédiments stockés dans le chenal et dans les larges vasières intertidales qui se développent dans sa partie intermédiaire. En effet, le compartiment sédimentaire joue un rôle important dans la réduction de l'eutrophisation en stockant les éléments chimiques associés aux sédiments, notamment les oxydes de fer et de manganèse qui seraient responsables de l'adsorption d'une grande fraction du phosphore inorganique dissous présent dans les eaux interstitielles, contribuant à limiter sa diffusion vers la colonne d'eau. De premiers indices semblent démontrer que ce « rideau de fer » n'est toutefois pas aussi performant à toutes les périodes de l'année. Les conditions estivales (stratification des cours d'eau, augmentation de la température et diminution de l'oxygène dissous) favoriseraient ainsi un déstockage important du phosphore en direction de la colonne d'eau via la dissolution des oxydes ferriques. Or en recyclant activement le phosphore contenu dans les sédiments superficiels, ces flux pourraient soutenir les blooms phytoplanctoniques déjà récurrents à ces périodes de l'année, aggravant de ce fait les phénomènes hypoxiques qui sont associés à leur dégradation. Pour tenter d'estimer l'importance de ce processus, **le projet OXYMORE 1** (2019-2021), financé par AELB, la Région Pays de la Loire et le Grand Port Maritime de Nantes, a tenté d'approcher la question en prélevant des carottes d'interface (~60cm) en août 2020, février, juin et août 2021 afin d'étudier la variabilité saisonnière des processus de stockage / déstockage du phosphore et des espèces chimiques réductrices dans le sédiment superficiel. Les incubations et analyses biogéochimiques réalisées sur les sédiments de l'estuaire démontrent que la réactivité de ces derniers reste faible en période estivale et que cette dernière serait en grande partie portée par des processus anaérobies. Les résultats obtenus dessinent ainsi un compartiment sédimentaire très rapidement vidé de son stock de phosphore inorganique une fois exposé aux conditions hypoxiques. Si les quantités de phosphore inorganique accumulées semblent être lessivées entièrement chaque année, l'importance du phénomène reste encore à préciser par l'étude du sédiment estuarien dans les phases les plus précoces du phénomène. Les résultats acquis récemment (juin 2021) promettent ainsi de soulever ce verrou scientifique majeur et d'alimenter les discussions autour de l'origine de ces phénomènes hypoxiques pour guider efficacement les futures politiques de gestion de ces espaces.

Mots-Clés : Incubation, Flux, interface eau-sédiment, Nutriments, Oxygène, Hypoxie, Anoxie, DCE



**T9.1. Processus élémentaires
géomorphologiques (transport de sédiment,
érosion des versants/rivières, incision du lit
rocheux, glissements de terrain) – Démarche
“Source-to-Sink” (S2S) et formation des
surfaces d’aplanissement d’échelle
continentale**



Geomorphic expression of the suspected active back-arc thrustfault around Jakarta, Indonesia

Sonny Aribowo ^{*1,2}, Laurent Husson ¹, Danny H. Natawidjaja ², Christine Authemayou ³, Mudrik R. Daryono ², Pierre Valla¹

¹ ISTerre, Université Grenoble Alpes -France

² Research Centre for Geotechnology, Indonesian Institute of Sciences - Indonesia

³ Université de Bretagne Occidentale - France

Baribis-Kendeng Fault System prolongate on the northern part of Java Island as the fold-thrust belt in the back-arc platform. It runs through the important cities on Java Island from the Surabaya in the east through Jakarta in the west. The Kendeng Fault Zone in the eastern part of Java is clear as the longest fold-thrust belt on the island. On the western part of Java, The Baribis Fault Zone seems to be more segmented compared to the Kendeng Fault Zone.

Previous studies based on GPS data suggest the Baribis-Kendeng Fault System is active. There is also a model mentioned that the earthquake event struck Jakarta in the 1780 sourced from the Baribis Fault Zone.

We would like to map the active fault around the Jakarta region based on the 8 meter DEM data to show the trace of the Baribis Fault Zone to the west. We also did the channel steepness index calculation to see the maturity of the river profile the truncated by the fault. According to our result, there are topographic scarps show the thrust fault runs through Cibinong region, Bogor at the southern part of Jakarta. The channel steepness index of three river profiles respectively from west to east: Cisadane River, Ciliwung River and Cikeas River suggest that the rivers are mature and concave that show the uplifted are in the hanging wall of the fault.

It is still far to mention that the thrust fault in the southern part of Jakarta is active since the lack of paleoseismology data. However, the trace could be connected with the Baribis Fault Zone. The fault might be related as well with the cluster of the earthquake event near Bogor area. Beyond the thrust fault, Jakarta region is also shaken with the earthquake sourced from these faults : subduction zone, Cimandiri Fault and also the strike-slip fault near Cikarang.

Mots-Clés : Jakarta, active fault, Baribis, back-arc, Java



La reconstitution de la forme initiale des îles volcaniques comme méthode pour quantifier l'érosion côtière à long terme et hiérarchiser les facteurs qui la contrôlent

Rémi Bossis ^{*1}, Vincent Regard ¹, Sébastien Carretier ¹

¹ Géosciences Environnement Toulouse (GET) – CNRS, IRD, Université Toulouse III Paul Sabatier – France

Le flux global de matière du continent vers l'océan est généralement réduit à l'apport de sédiments des fleuves et des rivières, et est estimé à environ 20 Gt/an. Un autre apport de sédiments du continent vers l'océan est celui généré par l'érosion côtière, mais ce flux, difficile à estimer à l'échelle globale, est souvent négligé, peut-être à tort selon des études récentes. La plupart des études tentant de quantifier l'érosion côtière se concentrent sur le littoral des pays développés et se limitent souvent à l'échelle de la décennie voire du siècle. La difficulté de quantifier l'érosion côtière à long terme vient du fait qu'il y a encore de nombreuses inconnues sur les facteurs contrôlant cette érosion, et qu'il serait nécessaire de connaître la géométrie initiale des littoraux pour calculer un volume érodé. Les îles volcaniques semblent être de très bons objets d'étude pour remédier à ces limitations. En effet, beaucoup d'îles volcaniques jeunes ne sont constituées que d'un seul édifice central et ont une forme conique, avec une symétrie radiale dominante malgré sa dégradation par l'érosion. Grâce à l'analyse géomorphologique de ces îles, il est possible de reconstituer leur forme initiale et l'extension maximale de leurs côtes. Ainsi, en connaissant l'âge d'une île et en la comparant avec sa forme actuelle, on peut calculer un taux d'érosion côtière moyen intégré sur l'âge de l'île. De plus, les îles volcaniques permettent, de par leur diversité géographique, pétrologique et tectonique, de comparer l'influence de différents facteurs sur l'érosion côtière à long terme (tels que le climat, la houle, la résistance des roches...) et de les hiérarchiser pour proposer des lois d'érosion côtière qui seraient applicables à l'ensemble des côtes rocheuses. Cette méthode a été développée et appliquée sur l'île de Tristan da Cunha, dans l'Atlantique Sud, ce qui nous a permis d'obtenir une première estimation du taux d'érosion côtière qu'a connu l'île depuis sa formation.

Mots-Clés : Érosion côtière, côtes rocheuses, îles volcaniques, forme initiale, flux de matière





DYNAMIQUE DES STOCKS SEDIMENTAIRES A L'ECHELLE DU QUATERNAIRE ET PREDICTIONS D'EVOLUTION FUTURES : L'exemple de la côte Sud-Bretonne

Jean-Baptiste Cherfils*

LGO, Université de Bretagne Sud

Laboratoire Géosciences Océan – UMR 6538

L'étude de dynamique passée, présente et future des milieux littoraux revêt, aujourd'hui dans le contexte de transgression marine actuel, un enjeux sociétal majeur quand on sait la part de la population et de l'économie mondiale qui y sont concentrés.

Cette étude propose le croisement de jeux de données de stratigraphie terrestre, marine et d'hydrodynamisme pour tenter de retracer l'histoire des stocks sédimentaire le long du littoral sud-morbihannais et sur le plateau continental au droit de celui-ci. Ce travail s'est articulé autour de trois échelles de temps la dizaine d'années pour les données de houle, la dizaine de milliers d'années pour les données sismiques en mer et la centaine de milliers d'années pour les données sédimentaires à terre.

Dans cette zone, on retrouve des littoraux variés : des plages sableuses et des côtes à dénudation étant inégales en hydrodynamisme et en réponse face à la transgression marine. Des dépôts estuariens et pro-estuariens ont été décrits dans la littérature mais jamais analysés en parallèle de la courbe de la dernière transgression marine. Enfin nous avons répertorié des affleurements de dépôts fossiles au niveau de falaises littorales qui n'ont pas fait l'objet de description et d'études exhaustives.

Le but ultime de cette étude a été de dégager les principaux paramètres à l'origine de la distribution sédimentaire passée, actuelle et future sur les côtes et le plateau continental sud-breton.

Mots-Clés : Dynamique sédimentaire ; Eustatisme ; sédiments reliques ; sédiments actifs



Influence de la variabilité des débits sur les taux d'érosions et le relief long-terme : l'exemple de la bordure sud-est du Massif Central, France

Clément Desormeaux^{1*}, Vincent Godard¹, Dimitri Lague², Guillaume Duclaux³,
Jules Fleury¹, Lucilla Benedetti¹, Olivier Bellier¹ & ASTER Team¹

¹ Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, INRAE, CDF – CEREGE – France
² Université de Rennes, CNRS, OSUR – Géosciences Rennes – France

³ Université de Côte d'Azur, CNRS, OCA, IRD – Géoazur - France

L'évolution des paysages résulte de l'action conjointe des forçages tectoniques et climatiques. Ces processus n'agissent pas de manière continue mais via des événements ponctuels (séismes, glissements de terrains, crues majeures) qui, intégrés sur des temps longs conduisent à la formation des reliefs. L'incision fluviale contrôle la dénudation des paysages et, est souvent modélisée comme une fonction de la contrainte de cisaillement et de la puissance du cours d'eau. Ce type de modèle (Stream Power Model) exprime l'incision des rivières en fonction de l'aire de drainage et de la pente du chenal qui sont des variables facilement quantifiables à partir des données topographiques. Néanmoins, il ne prend pas en compte certains paramètres tels que le seuil d'incision et la variabilité des débits, ce qui a nécessité des évolutions de ce modèle (Stochastic ...) devant encore être validées par des données de terrain.

La bordure sud-est du Massif Central est une zone intéressante pour étudier ces problématiques car elle présente des épisodes de fortes précipitations concentrées sur le relief, entraînant des différences marquées dans les distributions des débits. Nous testons ces modèles en quantifiant les taux d'érosion à l'aide des nucléides cosmogéniques (¹⁰Be), en caractérisant la variabilité des débits avec les stations hydrométriques et en effectuant une analyse morphologique des profils de rivières. L'analyse de 326 stations hydrométriques nous permet d'observer un fort gradient de variabilité des débits depuis la bordure SE jusqu'à l'intérieur du massif. Les concentrations en ¹⁰Be mesurées dans les sédiments des rivières de 34 bassins versants impliquent une grande variation des taux d'érosion entre 29 et 126 mm/ka. Nous comparons ces taux avec diverses paramètres hydro-morphologiques et, intégrons ces observations dans le cadre des modèles. Nos résultats confirment l'existence des relations non linéaires entre les taux de dénudation et le steepness index et leur dépendance à la variabilité hydrologique et au runoff.

Mots-Clés : événements extrêmes, modèles d'incisions, taux de dénudations, variabilité des débits, morphométrie, Massif Central



Evolution géomorphologique quaternaire des cours moyens et terminaux de la Seine. Approche intégrée géochronologique.

Kim Genuite ^{*1}, Pierre Voinchet ², Jean-Jacques Bahain ², Dominique Todisco¹,
Daniel Ballesteros ³, Carole Nehme ¹, Damase Mouralis ¹

¹ Laboratoire IDEES – UMR 6266 CNRS / Université Rouen Normandie - France

² Laboratoire HNHP – UMR 7194 CNRS / MNHN / UPVD - France

³ Université de Grenade - Espagne

Les cours moyens et inférieurs de la Seine conservent, imprimés dans la Craie de Normandie, les traces de l'incision et des différents stades d'évolution de la rivière au cours de son incision. De nombreux paléo-méandres inscrits témoignent de ces différents stages et de l'évolution des trajectoires du cours d'eau pendant le Quaternaire. L'analyse morphométrique et stratigraphique par le biais des données topographiques haute-résolution (LiDAR) et des outils SIG permet de décrire ces évolutions à l'aide d'indices morphométriques (sinuosité, radius, longueur d'onde, largeur des bandes actives, etc). Ces observations et mesures permettent de décrire les évolutions paléogéographiques du cours d'eau ainsi que leurs différentes trajectoires au fil de son incision dans la Craie normande. Les données géologiques (forages, carte géologique) sont combinées avec les informations du surface (topographie, affleurements) afin de construire une cartographie géomorphologique à l'échelle de la moyenne et basse vallée de la Seine. Afin de s'affranchir de l'influence de l'estuaire, qui cache une partie des informations, le modèle numérique de terrain a été normalisé en fonction de la géométrie du talweg rocheux, permettant une meilleure attribution des niveaux fluviaux et leur corrélation sur de grandes distances (env. 300 km). Les terrasses sont ainsi correctement corrélées par rapport au bedrock, malgré l'influence marine dans la basse vallée de la Seine. Cette démarche était un prérequis pour cibler précisément les affleurements à dater au moyen des méthodes combinées de l'ESR et du paléomagnétisme, notamment en domaine karstique.

L'ensemble de ces données permet de rediscuter du modèle d'incision de la vallée de la Seine. Ce dernier est notamment discuté vis-à-vis des dynamiques et enregistrements sédimentaires du karst de la Craie, des transformations régionales endogènes (surrection tectonique) et exogènes (glacio-eustatisme et bio-rhexistasie) qui influencent l'évolution des paysages du bassin de la Seine. Ces repères permettent également de proposer une cartographie renouvelée des dépôts, qui pourra être réexploité par les recherches archéologiques de la vallée de la Seine.

Mots-Clés : seine, ESR, géomorphologie, terrasses alluviales, karst, quaternaire



Feldspar single grain luminescence of modern fluvial sediments: a new tool for the study of continental erosion and fluvial transport

Anne Guyez ^{*1}, Stéphane Bonnet ¹, Tony Reimann ²,

Sébastien Carretier¹, Jakob Wallinga ³

¹ GET, Université de Toulouse, IRD, UPS, CNRS (Toulouse), France

² University of Cologne, Geographic Institute, Geomorphology & geochronology, Germany

³ Netherlands Center for Luminescence Dating & Soil Geography and Landscape group, Wageningen University, Wageningen, the Netherlands

In the recent decades, luminescence has been widely develop for dating Quaternary sedimentary deposits. One of the approaches is the single-grain post-infrared luminescence (SG-pIRIR) protocol, that provides high-resolution equivalent dose (De) distributions, allowing age estimation through befitting age models. This protocol is particularly adapted to fluvial deposits that often present large heterogeneity in De.

Here we present a SG-pIRIR analysis of 24 samples of modern sediments from rivers in the South Island of New Zealand, with the aim of testing their use as a tool for documenting and quantifying erosion and transport as proposed in some recent publications (McGuire and Rhodes, 2015; Gray et al., 2018). 14 are from the Rakaia and the Waimakariri rivers, braided systems that are output channels for tonnes of sediment eroded annually from the Southern Alps. Those rivers are braided in the Canterbury plain on about 130-150km, except on short sections of 10-20km where they are running into incised gorges. 10 others samples are from catchments on both sides of the main divide of the Southern Alps range for which we also measured ¹⁰Be catchment wide erosion rates.

Our aim is to use information from SG-pIRIR as a geomorphic tool to better understand (1) characteristic transport lengthscale, remobilization pattern and origin of the grain transported alongstream braided rivers; (2) compare luminescence signal and ¹⁰Be catchmentwide erosion rate. To do so, we focused on the fraction of saturated and well-bleached grains from De distributions as proxies for respectively input of grains from bedrock and for transport and transient storage of particles in floodplains. We demonstrate for the first time that these proxies actually depend on catchment-wide erosion rates and show how these signals are modulated during downstream sediment transport in the braided rivers. Our preliminary results also suggest that remobilisation of grains from the floodplain must be taken into account to understand the longitudinal trends in single grain De distributions alongstream.

Mots-Clés : Luminescence, fluvial transport, erosion rate, single-grain, braided rivers.



Unravelling present days tectonics from channel steepness in a lithologically complex landscape

Boris Gailleton ^{*1,2}, Hugh Sinclair², Simon Mudd², Emma Graf² et Liviu Matenco³

1 : Earth Surface Process Modelling - GFZ Potsdam - Germany

2: School of Geosciences - University of Edinburgh - United

Kingdom3: Department of Earth Sciences – Universiteit
Utrecht - Netherland

Studies aiming to link topography with tectonics have focused on the main erosive engine of non-glaciated landscapes: the river system. The availability and resolution of digital elevation models (DEM) has increased dramatically over the last decade, and topographic analysis has become a widely-used tool to get spatially continuous information about tectonic forcings. Fluvial morphology, however, does not reveal such information easily. Being at the interface between the earth surface and atmosphere, it is affected by a wide range of forcing factors, which can be external, such as faulting and changes in climate, or internal, such as variations in rock hardness or degree of fracturing. When both types of forcing occur coevally, or in the same location, it presents a challenge for geomorphologists to isolate any individual factor. Failure to account for multiple factors leads to potential misinterpretation, for example where steepening of a channel network due to lithologic contrasts could be misinterpreted as a function of increased tectonic displacements. These misinterpretations are enhanced over large areas, where landscape properties needed to calculate channel steepness (channel concavity) can vary significantly in space. Ambiguity is most prominent when faults juxtapose different rock types, a common feature of mountain ranges, raising the question whether the fault is active or not.

In this study we investigate the relative channel steepness over the Eastern Carpathians where it has been proposed that ongoing, syn-orogenic rock uplift in the Southeastern Carpathians part gives way N- and NW-wards to ca. 8 Myrs of post-orogenic quiescence. We develop a technique to quantify relative channel steepness based on a wide range of concavities, and show that the main signal shows an increase in channel steepness from east to west across the range. Rock hardness measurements suggest this difference is driven by lithology. When we isolate channel steepness by lithology to test for ongoing rock uplift along the range, we find steeper channels in the south of the study area along tectonic units of the frontal ranges. This supports interpretations from longer timescale geological data that active rock uplift is fastest in the southern Southeastern Carpathians, and indicates that this increased uplift is dominantly a characteristic of the frontal portions of the thrust wedge. It also demonstrates that the use of channel steepness to extrapolate information obtained from expensive discrete analysis (e.g. thermochronometers) is not restrained to homogeneous simple landscapes.

Mots-Clés : Géomorphologie Fluviale, Carpathes, Channel Steepness



Flexure, propagation et enregistrement des perturbations climatiques et tectoniques dans un système source-to-sink : apport de modélisation numérique

Laure Guerit ^{*1}, Delphine Rouby ², Cécile Robin ¹, François Guillocheau ¹, Jean Braun ³

¹ Univ Rennes, CNRS, Géosciences Rennes, UMR6118, Rennes - France

² Géosciences Environnement Toulouse - France

³ GZF, Helmholtz Centre Potsdam - Allemagne

Les variations climatiques et tectoniques qui affectent les paysages induisent des signaux qui peuvent être transmis et enregistrés, en particulier dans les bassins sédimentaires. Ces signaux peuvent être transformés au cours de leur transfert des sources jusqu'aux puits, ce qui rend leur détection et leur interprétation parfois complexe. Aujourd'hui, il est toujours difficile de prédire si et comment un signal sera modulé au cours de sa propagation.

Le développement récent des codes numériques d'évolution de paysages intégrant l'érosion et le dépôt des sédiments depuis les zones sources jusqu'aux bassins sédimentaires permet de révisiter cette question avec une approche source-to-sink. Dans cette étude, nous utilisons le code numérique FastScape (<https://fastscape.org/>) pour simuler l'évolution d'une chaîne active en érosion et de son retro-bassin d'avant-pays. La chaîne est soumise à des précipitations uniformes et à une surrection verticale tandis que le bassin évolue par déformation flexurale de la lithosphère. Dans un premier temps, nous explorons la sensibilité de ce système continental aux différents paramètres qui contrôlent l'érosion, le transport et le dépôt des sédiments : vitesse de surrection, taux de précipitation, coefficient de dépôt, érodabilité et épaisseur élastique de la lithosphère. Nous mettons en évidence les relations entre ces paramètres, la topographie et le temps d'équilibre.

Nous explorons ensuite la réponse de ce paysage à une perturbation (haute ou basse) permanente des précipitations ou de la surrection. Une telle perturbation entraîne une réponse du système à la fois en terme de topographie et de flux sédimentaire, d'autant plus marquée que la perturbation se met rapidement en place. Nous observons que la réponse du bassin d'avant-pays est dominée par le changement topographique de la chaîne qui induit un changement de la déformation flexurale, et non par la nature de la perturbation. Lorsque la chaîne croît (augmentation de la surrection ou baisse des précipitations), une phase transitoire de dépôt est observée dans le bassin d'avant-pays. Au contraire, une phase transitoire d'érosion est observée si l'altitude de la chaîne diminue (baisse de la surrection ou hausse des précipitations). Ce comportement (stockage ou déstockage) contribue activement à la modulation des signaux climatiques et tectoniques des sources aux puits. Dans nos simulations, nous observons que les signaux climatiques sont systématiquement amplifiés tandis que les signaux tectoniques sont tamponnés entre les sources et les puits. Avec les paramètres explorés ici, la réponse flexurale explique 40% de la modulation du signal et augmente le temps de retour à l'équilibre du système d'un facteur 2 à 4.

Mots-Clés : Propagation de signaux, modélisation numérique, flexure, enregistrement sédimentaire, perturbation



Evolution paléoenvironnementale et « Source-to-Sink » du bassin molassique du Bas-Dauphiné

Huet Bastien ^{*1}, Nicolas Bellahsen ¹, Nicolas Loget ¹, Eric Lasseur ², Justine Briais ², Jean-Baptiste Girault ¹, Jean-Loup Rubino ³, Philippe Sorrel ⁴

¹ Institut des Sciences de la Terre de Paris, Sorbonne Université – France

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières – France

³ TOTAL SA, Centre Scientifique et Technique Jean Féger – France

⁴ Laboratoire de géologie de Lyon : Terre, planètes, environnement, Université de Lyon – France

Le Bas-Dauphiné est une dépression située au nord de la vallée du Rhône. Il fut le siège d'une sédimentation épaisse (2500 mètres) et relativement continue entre l'Eocène supérieur et le Miocène. Il forme un des principaux bassins du sillon rhodanien le long duquel s'effectue le routage sédimentaire depuis les Alpes. Son histoire tectono-sédimentaire polyphasée est marquée successivement par la phase pyrénéo-provençale, le rifting ouest-européen, la compression alpine et la crise messinienne, ce qui en fait une zone où la subsidence, les sources, le piégeage et le transit de sédiment ont largement évolué au cours du temps. Le but de cette étude dans le cadre du RGF Alpes est de reconstituer l'évolution du routage sédimentaire dans cette zone de l'Eocène supérieur au Miocène supérieur et son lien avec la mise en place du prisme orogénique alpin. Dans ce contexte, une réinvestigation des différentes données de la zone (forages, sismique) appuyée par de nouveaux éléments (terrain) a permis de reconstituer l'évolution de ce bassin. Les tout premiers résultats indiquent des environnements de dépôt fluvio-lacustres à l'Eo-Oligocène subdivisés en deux séquences de dépôts majeures rattachées respectivement à une phase syn-rifting ouest européen et à une phase post-rift. Les dépôts fluviaux sont canalisés dans un système de vallées incisées qu'il est possible de suivre depuis la Bresse jusqu'au sud de la zone et qui est probablement repris au Langhien. Le remplissage miocène a fait l'objet de récentes études en termes de faciès et d'architecture sédimentaire que nous remettrons dans le contexte de l'évolution du système « Source-to-sink ». L'influence centralienne en termes de sources est présente tout au long du remplissage et est d'ailleurs bien marquée au Miocène avec la progradation du delta ouest-centralien dans la fosse de Valence, de manière contemporaine à la surrection des premiers chaînons subalpins.

Mots-Clés : Source-to-Sink, Alpes, stratigraphie, Cénozoïque, vallées incisées



Enregistrement des invasions glaciaires pléistocènes dans le karst des Bauges occidentales (Savoie, France).

Stéphane Jaillet ^{1*}, Charlotte Honiat ², Edwige Pons-Branchu ³, Isabelle Couchoud ¹,
Fabien Hobléa ¹, Tanguy Racine ², Christoph Spötl ²

¹ EDYTEM, Université Savoie Mont Blanc, CNRS, France

² Innsbruck Quaternary Research Group, University of Innsbruck, Austria

³ LSCE, Université Paris-Saclay, France

Les dates absolues du maximum de la glaciation alpine, pendant le Würm (MIS 4, 3, 2), ne convergent pas entre les travaux réalisés en France (lobe de Lyon) et ceux réalisés en Suisse (lobe du Rhône). Ces derniers montrent un maximum de couverture glaciaire au cours du MIS 2, tandis que des travaux plus anciens en France suggèrent un englacement maximal plus ancien. Nous proposons ici un nouvel enregistreur : le karst paraglaciale des Bauges occidentales (Préalpes françaises, Savoie). Entre 1200 m et 500 m d'altitude, plusieurs cavités karstiques sont en position latérale par rapport au glacier de l'Isère. Ce glacier a envahi le massif calcaire des Bauges et la vallée du Chéran par une transfluence (difffluence glaciaire latérale avec débordement) contrôlée par un col à 980 m d'altitude. Le matériel allochtone identifié dans le karst (galets et sables) scelle, ou est scellé par, des spéléothèmes qui constituent des Terminus Ante Quem et Post Quem de plusieurs invasions glaciaires. D'autres spéléothèmes sont inondés par la montée des eaux dans le karst, montée associée à des beuragges de till glaciaire. Enfin, d'autres sont choqués par l'évacuation de galets dans un contexte post-glaciaire. 24 dates U/Th sont présentées ici et couvrent les stades isotopiques 9 à 1. Pour les stades 4 à 2, elles permettent, indirectement, de mieux contraindre les différentes invasions glaciaires dans le karst des Bauges et in fine de rediscuter le maximum de glaciation alpine durant le Würm (MIS 4, 3, 2). Au final, sans éliminer la possibilité d'une invasion maximale durant le MIS 2, nous montrons qu'un blocage maximal durant le MIS 4 et une recrudescence locale, mais non maximale, durant le MIS 2 est compatible avec cette nouvelle série de dates.

Mots-Clés : karst, Würm, englacement, Bauges, spéléothèmes



Impact d'un changement climatique brutal sur les flux sédimentaires à l'échelle du système « source-to-sink » : Exemple du PETM dans le Bassin sud-pyrénéen

Marine Prieur ^{*1}, Alexander C. Whittaker ², Fritz Schlunegger ³, Tor O.Sømme⁴,
Jean Braun ⁵, Sébastien Castelltort ¹

¹ Département des Sciences de la Terre, Université de Genève - Suisse

² Imperial College, London - United Kingdom

³ University of Bern - Switzerland

⁴ EQUINOR Oslo - Norway

⁵ GFZ Helmholtz Centre, Potsdam - Germany

La géomorphologie - actuelle, passée ou future - d'une région est dépendante des conditions climatiques, tectoniques et eustatiques lors du dépôt. Chacun de ces facteurs allocycliques impacte les processus sédimentaires d'érosion, de transport et de dépôt de différentes manières dans le temps et l'espace. L'étude de systèmes anciens est un outil privilégié pour comprendre la réponse des systèmes sédimentaires actuels à une perturbation exogène. De nos jours, et étant donné l'augmentation des concentrations en carbone atmosphérique, l'étude des perturbations climatiques passées est primordiale. Parmi elles, le maximum thermique décrit entre le Paléocène et l'Éocène (PETM), il y a 56 Ma, est un des meilleurs analogues.

Cette étude se concentre sur le bassin d'avant-pays sud-pyrénéen (Espagne), où affleure un système sédimentaire complet, du milieu continental (Trempe) au bassin turbiditique profond (Zumaia). Durant le PETM, l'ensemble du système enregistre une augmentation des apports silicoclastiques. L'objectif ici est de quantifier les variations de flux sédimentaire via une démarche « source-to-sink ». Un traçage des sources par analyses pétrographiques et sur minéraux lourds permet tout d'abord de mieux contraindre la paléogéographie. Les processus de transport sédimentaire sont décrits à travers l'architecture des entités (types d'écoulements, dimension des chenaux et amalgamation). Une approche granulométrique permet de quantifier le pouvoir diffusif du transport des sédiments à travers l'ensemble du système.

Une estimation qualitative et quantitative de l'évolution des flux sédimentaires dans un contexte de changement climatique brutal est proposée. L'analyse d'un système dans son entier peut amener des clés de raisonnement pour les évolutions géomorphologiques auxquelles nos sociétés vont faire face.

Ce travail s'inscrit dans un projet de thèse financé par le projet ITN européen S2S-FUTURE (Marie Curie, Grant Agreement N° 860383).

Mots-Clés : Source-to-sink, PETM, Flux sédimentaires, Granulométrie, Pyrénées



T10.1. Big Data en Sciences de la Terre



Apprentissage automatique profond et données géologiques: vers des assistants numériques intelligents pour les géosciences ?

Antoine Bouziat ^{*1}, François Cokelaer ¹, Renaud Divies ¹, Sylvain Desroziers ¹,
Mathieu Feraille ¹

¹ IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison, France

L'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique profond bénéficient actuellement d'un fort intérêt et d'une médiatisation dépassant les cercles scientifiques traditionnels. En particulier, le succès commercial de Siri et d'Alexa a popularisé la notion d'assistant numérique intelligent. Celle-ci désigne des systèmes combinant apprentissage profond et compréhension du langage naturel afin d'aider leurs utilisateurs dans des tâches routinières. Nous abordons ici l'application de cette notion en géologie, à partir de deux cas d'usages concrets en exploration pétrolière.

Le premier cas d'usage concerne la caractérisation de roches mères par l'extraction automatisée d'informations depuis une bibliographie. Tout d'abord, une ontologie est construite pour modéliser les formulations les plus courantes dans les documents concernés. Puis un système d'apprentissage profond est entraîné sur une centaine de textes, manuellement annotés en suivant cette ontologie. Le système devient alors capable d'extraire automatiquement les informations ciblées dans de nouveaux documents. Ces informations sont stockées dans une base de données spécifique et leur exploitation est facilitée par un interpréteur de requêtes en langage naturel, interfacé dans une application web.

Le second cas d'usage concerne l'analyse accélérée de résultats de simulations numériques en modélisation de bassin. Ces résultats sont connectés à un système d'apprentissage profond, conçu pour traduire en requêtes numériques des questions formulées en langage naturel, de les appliquer sur une base de données et de fournir une réponse à l'utilisateur. Après un entraînement dédié, ce système conversationnel devient capable de dépouiller de manière autonome un modèle de bassin pour répondre à des questions géologiques.

Ces deux démonstrateurs illustrent le potentiel de l'apprentissage profond en géologie, tout en soulignant la nécessité d'un entraînement spécifique pour adapter les technologies aux besoins métier.

Mots-Clés : Intelligence artificielle, Apprentissage automatique profond, Roches mères, Modélisation de bassin



Traitement InSAR des données Sentinel-1 à l'échelle continentale: le projet FLATSIM

J. Donadieu ¹, P. Durand ¹, C. Proy ¹, B. Specht¹, D. Clesse ², E. Deschamps-Ostanciaux³, M. Diament ³, R. Grandin ³, E. Pointal ³, M.-P. Doin ⁴, C. Laurent ⁴, E. Pathier ⁴, F.Thollard ⁴, C. Lasserre ^{*5}, L. Lemrabet ⁵

¹ CNES - France

² Cap Gemini - France,

³ IGP - France,

⁴ Université Grenoble-Alpes, CNRS, ISTERRE - France

⁵ Univ Lyon, Univ Lyon 1, ENSL, CNRS, LGL-TPE - France

Dans le cadre de l'Infrastructure de Recherche Data Terra et de son pôle de données et services pour la Terre Solide ForM@Ter, le CNES développe un nouveau service dédié au traitement InSAR des données Sentinel-1, adapté de son service MUSCATE (Multi Satellites, multi-Captors, for multi-TEmporal data). Il s'agit du service FLATSIM (ForM@Ter LARge- scale multi-TEmporal Sentinel-1 InterferoMetry). Il permet la production systématique d'interférogrammes à partir de données Sentinel-1, ainsi que de séries temporelles de déplacement, sur de grandes zones géographiques. Il est basé sur la chaîne de calcul InSAR NSBAS (Doin et al., 2011, Grandin, 2015). Les objectifs scientifiques sont de permettre la mesure des déformations de la surface de la Terre à l'échelle continentale, et d'assurer la surveillance spatio-temporelle de régions critiques soumises aux aléas naturels (grandes zones de failles actives et systèmes magmatiques, glissements de terrain à l'échelle de grands massifs par exemple). Nous présentons ici : (1) l'architecture de la chaîne de traitement FLATSIM au CNES, (2) les produits distribués, comprenant les piles d'interférogrammes coregistrés, les séries temporelles de déplacement et les cartes de vitesse moyenne en géométrie radar et sol, ainsi qu'un ensemble de produits ou fichiers auxiliaires tels que le réseau d'interférogrammes, les cartes de délai atmosphérique utilisées pour corriger les interférogrammes, les cartes de cohérence spatiale et temporelle, etc, (3) les premiers résultats sur de larges zones test dans l'est du plateau tibétain ou en Afar, ainsi que (4) la politique et les perspectives d'accès aux services et de distribution des produits, via notamment des appels à idées (le premier lancé au printemps 2020) et le catalogue ForM@Ter.

Mots-Clés : Déformation; InSAR; Copernicus; Sentinel-1



A deep Learning approach for detecting transient deformation in InSAR

Bertrand Rouet-Leduc¹, Romain Jolivet^{2,*}, Manon Dalaison², Paul Johnson¹,
Claudia Hulbert¹

¹ Los Alamos National Laboratory, Geophysics Group - USA

² Laboratoire de Géologie, École Normale Supérieure - France

Active faults release tectonic stress imposed by plate motion through a wide variety of slip events, from creep to slow, aseismic events, to dynamic, seismic slip. Systematic characterization of all modes of slip is key to unravel the physics of tectonic faulting and the interplay between slow and fast earthquakes. Rapid and large amplitude ground deformation induced by large magnitude earthquakes are now routinely imaged by InSAR, but measuring interseismic and postseismic slip, both of smaller amplitude and slower than earthquakes, remains challenging due to atmospheric propagation delays which may exceed the signature of deformation in InSAR time series. Although atmospheric correction methods improve our ability to observe slow and small (i.e. mm/yr) deformations, expert interpretation and *a priori* knowledge of fault systems is always required to highlight deformation signals. Here we introduce a deep learning architecture, tailored to remove atmospheric delays due to turbulence and layering of the atmosphere, as well as to identify and extract transient episodes of ground deformation.

Mots-Clés : Interferometric Synthetic Aperture Radar, Deep Learning, Slow Slip



ODATIS : un portail unique pour les données marines françaises pour faciliter l'accès aux données et à leurs produits

Sabine Schmidt^{*1}, Cécile Nys², Joël Sudre³, Valérie Harscoat², Caroline Mercier⁴,
Gérald Dibarboure⁵, Gilbert Maudire²

¹ CNRS, OASU, UMR5805 EPOC, Université de Bordeaux, Pessac, France

² Ifremer, Centre de Bretagne, Plouzané, France

³ UMS CPST, Montpellier, France

⁴ Akka, Toulouse, France

⁵ CNES, Toulouse, France

L'océan est le plus grand compartiment de la Terre et les conséquences actuelles et attendues du changement global y sont multiples. Toutefois, la détection des changements et des impacts est encore difficile à mettre en évidence, en raison de la grande variabilité des environnements océaniques et de l'accès encore difficile aux données. Au cours des dernières décennies, le nombre d'observations marines a nettement augmenté, que ce soit par des instrumentations *in situ*, des campagnes océanographiques, ou la télédétection, et nécessite désormais des outils efficaces pour mettre à la disposition de la communauté scientifique des quantités de données aussi importantes. Lancé en décembre 2017 (www.odatis-ocean.fr), le portail du pôle Océan de l'IR Data Terra, est le point d'entrée pour accéder aux données marines françaises, du littoral au large, et de la surface au fond de l'océan. Ses objectifs sont de faciliter l'utilisation des observations océaniques, de contribuer à la compréhension de l'océan et de ses interactions aux interfaces avec l'atmosphère, le continent et le sous-sol océanique. Les données gérées par ODATIS comprennent les variables de toutes les disciplines marines (physique, chimie, biologie...).

La mission principale d'ODATIS est de mettre à disposition des données, des produits, des logiciels, des outils et/ou des services destinés principalement à la communauté scientifique française travaillant dans le domaine de la recherche océanographique, dans le respect des principes FAIR. Les principes FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) visent à rendre les données découvrables, accessibles, interopérables et réutilisables. Le Pôle Océan propose aussi aux producteurs de données la fourniture d'un DOI pour un jeu de données (www.seanoe.org). Cette communication sera ainsi l'occasion d'échanger avec la communauté des Sciences de la Terre dont les données (comme celles acquises à l'interface eau-sédiment) sont encore peu bancarisées.

Mots-Clés : pôle de données, ODATIS, FAIR, big data, doi



MarsSI : un service de traitement des données de surface martiennes

Matthieu Volat^{1*}, Cathy Quantin-Nataf¹, Lucia Mandon¹, Patrick Thollot¹, François Poulet²

¹Laboratoire de Géologie de Lyon Terre, Planètes, Environnement (CNRS-ENSLyon-Université Lyon1), 2 rue Raphaël Dubois 69622 Villeurbanne Cedex, France

²Institut d'Astrophysique Spatial, Université Paris 11-Orsay, France

Les investigations géologiques des surfaces planétaires requièrent la combinaison de données orbitales. Avec désormais de nombreuses plateformes instrumentales fournies par les agences spatiales, la quantité de données disponibles a rapidement augmenté. Elle est assez conséquente pour demander un système spécifique d'exploration et extraction des informations pertinentes.

MarsSI (Mars Système d'Information, <https://marssi.univ-lyon1.fr>) est une plateforme développée avec le but de permettre aux scientifiques d'accéder aux données orbitales martiennes. Il a été labellisé en 2017 par le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) comme service national d'observation dans le cadre du Planetary Surface Portal (PSUP). Le but est de permettre à l'utilisateur de naviguer et réclamer des données prêtes à l'emploi tant au niveau de leur calibration, traitement et géo-référencement. L'utilisateur pourra récupérer la donnée pour la visualiser et interpréter dans un logiciel de SIG ou des applications de télédétection.

L'infrastructure de MarsSI est composée d'un serveur, un système de stockage de 177To et une grille de calcul de 80 coeurs. Nous indexons les données optiques (longueurs d'onde du visible, données multi et hyper-spectrales) des missions Mars Odyssey, Mars Express et Mars Reconnaissance Orbiter. Notre catalogue d'empreintes, ainsi que des données cartographiques de contexte, sont mis à disposition sur le web en nous basant sur des services répondant aux normes OGC. Nous analysons également les jeux de données optiques CTX et HiRISE afin de trouver les correspondances d'images permettant de réaliser des Modèles Numériques de Terrain (MNT).

A partir de l'interface web, l'utilisateur peut demander l'exécution des chaînes de récupération et traitement de données de MarsSI. Nous offrons notamment une chaîne de traitement basée sur le Ames Stereo Pipeline pour la création automatisée de MNTs. Un des choix de conception de la plateforme est l'automatisation complète des traitements et la mise à disposition des résultats à tous les utilisateurs, permettant d'éviter la création d'un catalogue de résultat trop volumineux et complexe. Cela rend également l'utilisation du service plus facile.

Construit grâce à l'utilisation de composants de logiciels open-source et basé sur des protocoles standardisés, MarsSI offre à la communauté scientifique un moyen de chercher les données d'intérêt et procéder à leur traitement facilement.

Mots-Clés : Mars, Données, Traitement, Service, Plateforme



Accès et traitements des données en Terre solide : les services du pôle ForM@Ter

Emmanuel Chaljub ^{*1}, Aude Chambodut ², Emilie Deschamps-Ostanciaux³, Michel Diamant ³, Cécile Lasserre ⁴, Christelle Loiselet⁵, Elisabeth Pointal ³, Catherine Proy ⁶

¹ISTERRE – Institut des Sciences de la Terre - France

²Ecole et Observatoires des Sciences de la Terre – France

³Université de Paris, Institut de physique du globe de Paris, CNRS, F-75005 Paris – France

⁴Laboratoire de Géologie de Lyon Terre, Planètes, Environnement (LGTPE) – France

⁵Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

⁶Centre national d'études spatiales (CNES) – France

ForM@Ter est le pôle de données et de services dédié à la Terre solide au sein de l'infrastructure de Recherche Data Terra. Il a pour objectif de faciliter l'accès aux données acquises et gérées par les laboratoires de recherche et les dispositifs d'observation (SNO, IR, missions spatiales, ...) relevant du domaine Terre solide. Il s'inscrit dans le cadre de l'afflux massif de données sur la Terre solide issues de nouvelles missions spatiales (missions SENTINEL, les constellations...), de nouveaux types de capteurs sol (fibres optiques, ...) ou aéroportés, de dispositifs d'acquisition en antennes, de l'instrumentation citoyenne, sans oublier les données issues de modélisations numériques. ForM@Ter s'intéresse aussi à la mise en œuvre de la numérisation des archives de la Terre et s'inscrit pleinement dans le contexte de la science ouverte et de ses conséquences concrètes pour nos communautés.

Pour faire face à cet afflux massif de données, il est nécessaire de développer et mettre en œuvre des traitements, outils et moyens adaptés en tenant compte des spécificités des domaines scientifiques concernés et des contextes européen et international.

Pour contribuer à répondre à ces besoins, ForM@Ter a mis en place un portail permettant aux utilisateurs la découverte, la visualisation et l'accès à des données et des produits du domaine Terre solide via son catalogue de données qui évolue et est enrichi régulièrement. ForM@Ter offre également aux utilisateurs, experts ou non experts, la possibilité de lancer, sans téléchargement des données au préalable, des traitements pour obtenir des produits à valeur ajoutée tels que par exemple des modèles numériques de surface ou des interférogrammes à partir des données satellitaires optique ou radar. Cette communication permettra de présenter et d'échanger sur ces outils au service de la communauté scientifique Terre solide et celles des autres compartiments du système Terre avec des exemples de cas d'usage et d'applications.

Mots-Clés : Terre solide, données, services, big data,



T10.2. Outils isotopiques, développements et applications



Apport de la géochimie isotopique du calcium à l'étude du régime alimentaire chez les elasmobranches, le cas du requin gris *Hexanchus griseus*.

Alexandre Assemat ^{1*}, Sylvain Adnet ¹, Kani Bayez ², Auguste Hassler ²,
Florent Arnaud-Godet ², Frederik Mollen ³, Catherine Girard ¹, Jeremy E. Martin ²

1- UMR 5554 Institut des sciences de l'évolution de Montpellier ISEM (CNRS, IRD, EPHE),
Université de Montpellier, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5

2- Univ Lyon, Univ Lyon 1, ENSL, CNRS, LGL-TPE, 69342, Lyon, France

3- Elasmobranch Research, Belgium (ERB) Rehaagenstraat 4, 2820 Bonheiden, BELGIUM

Précédemment basée sur l'analyse du contenu stomacal, l'étude du régime alimentaire et de la position trophique des requins a connu un nouvel essor avec le développement des outils de géochimie isotopique au cours des dernières années. Ces outils ouvrent des perspectives nouvelles pour l'étude des espèces actuelles mais également fossiles dont le comportement demeure peu connu sur un plan écologique. Les isotopes de l'azote et du carbone issus de tissus mous ou minéralisés ont montré que leurs proportions respectives étaient corrélées avec un signal alimentaire global. Récemment, des analyses portant sur l'étude de l'évolution des compositions isotopiques du calcium ($\delta^{44}\text{Ca}$) ont montré une corrélation entre les proportions des isotopes du calcium compris dans l'émail des dents et la position trophique des taxons étudiés. Ici, nous présentons une étude se basant sur les changements de la composition isotopique du calcium de l'émail des dents de trois espèces de requins : le requingriset (*Hexanchus griseus*), le requin mako (*Isurus oxyrinchus*) et le grand requin blanc (*Carcharodon carcharias*) au cours de stades de croissances variés. Les résultats obtenus chez ces requins pouvant atteindre plusieurs mètres de long montrent une variabilité isotopique, et supposément alimentaire, coïncidant avec un changement de taille ou d'aire de répartition. Ces résultats permettent ainsi de caractériser un changement de niveau trophique corrélé avec l'ontogénie mais également avec la répartition des populations d'une même espèce, soulignant ainsi des changements d'exploitation des ressources alimentaires et des phases de charognage chez certains taxons.

Cette caractérisation de la variabilité isotopique du calcium au sein de plusieurs espèces actuelles présentant des alimentations différentes pourrait permettre, à terme, de mieux comprendre l'écologie d'espèces fossiles au travers de leurs restes dentaires, constituant le tissu le plus fréquemment préservé dans le registre fossile.

Mots-Clés : Géochimie isotopique, Elasmobranches, Position trophique, Isotopes du calcium, Alimentation



Mesure des isotopes de l'hydrogène contenus dans les tissus osseux et dentaires d'échantillons archéologiques et leur usage comme proxys paléoclimatiques et paléoalimentaires

Thibault Clauzel^{1,*}, Pascale Richardin^{2,3}, Jannick Ricard⁴, Yves Le Béchenec⁴, Romain Amiot¹, François Fourel⁵, Diana Joseph^{2,6}, Arnauld Vinçon-Laugier¹, Jean-Pierre Flandrois⁷ et Christophe Lécuyer¹

¹ Laboratoire de Géologie de Lyon (LGL-TPE) CNRS UMR 5276, Université Claude Bernard Lyon 1 - France

² Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France C2RMF, Palais du Louvre - France

³ PRETECH – Préhistoire et Technologie, CNRS UMR 7055, Université Paris Nanterre - France

⁴ TRAME (Université de Picardie Jules Verne) & UMR 8546, AOrOc, CNRS, ENS Ulm, Paris - France

⁵ Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés (LEHNA), CNRS UMR 5023, Université Claude Bernard Lyon 1 - France

⁶ CEREMA – Centre d'études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement, Trappes-en-Yveline - France

⁷ Université de Lyon, CNRS, UMR 5558, Laboratoire de Biométrie et Biologie Evolutive, Villeurbanne - France

La mesure et l'interprétation des isotopes stables de l'hydrogène souffrent d'incertitudes liées à des échanges élémentaires avec l'atmosphère et à l'influence combinée de l'eau de boisson et de la prise alimentaire. Le site archéologique Gaulois de Thézy-Glimont, Picardie, France, daté entre le 3^e et le 2^e siècle avant JC, a déjà été étudié isotopiquement, ce qui permet de bien connaître le climat et les pratiques alimentaires des individus analysés. La mesure des isotopes de l'hydrogène ($\delta^2\text{H}$) mesurée sur la matrice organique osseuse (collagène), sur l'émail dentaire et sur l'os global de 8 humains et 11 animaux peut alors être interprétée à la lumière de ces connaissances.

Le $\delta^2\text{H}$ du collagène osseux enregistre des signaux climatiques et alimentaires, comme attesté par les corrélations linéaires avec les isotopes stables de l'oxygène de l'eau météorique ($r^2 = 0.43$) et les isotopes stables de l'azote du collagène osseux ($r^2 = 0.79$). Des informations similaires sont enregistrées par l'émail dentaire, qui se révèle être également un potentiel traceur de pratiques d'allaitement. Enfin, la majorité ($\approx 70\%$) du $\delta^2\text{H}$ de l'os global semble provenir du collagène osseux et enregistre surtout l'alimentation. Analyser les tissus dentaires et osseux minéralisés pour en déduire l'alimentation et les conditions climatiques de vie de populations archéologiques présente de nombreux avantages car cela réduit le coût, le temps d'analyse, et la quantité de matériel à prélever. De plus, le collagène étant protégé dans les réseaux minéraux osseux, on s'affranchirait d'une potentielle diagenèse ou d'un échange élémentaire avec la vapeur d'eau atmosphérique. Ces applications pourraient devenir cruciales dans le cas où le matériel osseux est dépourvu de matière organique (populations préhistoriques) ou lorsque les dents sont le seul matériel disponible.

Mots-Clés : isotopes stables de l'hydrogène, os, dents, climat, régime alimentaire, Gaulois



Calcium isotopes; Pre-treatment method for paleontological samples and diet reconstruction of the Neanderthal Regourdou 1.

Pierre-Jean Dodat ^{*,1,2}, Vincent Balter ¹, Bruno Maureille ², Gilles Montagnac ¹

¹ LGLTPE, Université de Lyon, France.

² PACEA, Université de Bordeaux, France.

The calcium isotopic composition ($\delta^{44/42}\text{Ca}$) of bone and tooth enamel can be used for paleo- ecological reconstructions of extinct mammals. Under experimental conditions, the $\delta^{44/42}\text{Ca}$ value of bones and teeth varies as a function of diet with a constant isotope offset of about - 0.6‰. The archaeological and paleontological remains are subjected to numerous diagenetic processes, resulting, among other, in the addition of exogenous elements that overprint the original values.

Ca is resistant to diagenesis but its composition can be impacted by the incorporation of Ca carbonate within the micro-porosities of the studied tissue. In order to better characterize these inclusions and the pre-treatment applied to eliminate them, we analyzed synthetic samples of bone and calcium carbonate, as well as archaeological samples of enamel and bone.

Analysis by Raman spectroscopy proved to be effective in detecting and quantifying Ca carbonate inclusions in synthetic and archaeological samples. Analysis of element concentration and Ca isotopic composition revealed that the acetic acid leaching method was effective in removing Ca carbonates without altering the isotopic Ca composition of the archaeological samples, but could alter the original concentration of other elements. The application of this treatment method allowed the reconstruction of the European food web from Ca isotopes in the presence of Ca Carbonate. The results show that the $\delta^{44/42}\text{Ca}$ value of the circa 90kyr old Neanderthal Regourdou 1, and that of most carnivores in the Regourdou deposit are lower than herbivore which can be explained by the ingestion of meat and bone marrow containing at least 1% trabecular bone.

Keywords: Ca isotope, diagenesis, Diet, Raman



Towards a tracking of past bird seasonal migrations through geological times: an isotopic approach

Anaïs Duhamel ^{*1}, Romain Amiot ¹, Arnaud Vinçon-Laugier ¹, Antoine Louchart ¹

¹ Univ Lyon, UCBL, ENSL, UJM, CNRS, LGL-TPE, F-69622, Villeurbanne, France

Bird seasonal long-distance migrations are a massive consequence of seasonality on wildlife, initially supposed to have originated during the Pleistocene glacial-interglacial cycles, but now accepted to have arisen much earlier, probably as early as the late Paleogene. Still, concrete evidence for past bird migrations through geological times is lacking, and hitherto there exists no method to track them. Since long-distance migrants stop over areas with contrasted climatic conditions, and since oxygen isotope fractionation is known to be climate-dependent, an approach based on this isotopic signal recorded into birds' bones seems a promising avenue. Therefore, we have first built a model of oxygen incorporation into bird bones, for a dozen extant migratory and sedentary species after having gathered their GPS tracking data. Model outputs predict that migrating birds could be recognized from sedentary birds. Thus, an experimental protocol was built, comprising a precise bone sampling in order to isolate the isotopic signal corresponding to the birthplace versus that of the adult bird living places, coupled with a histological analysis. This protocol was first applied on extant bird specimens to test the model's tendency. The main result is that a latitudinal signal is indeed recorded into bones, and it was confirmed that a bird's migratory behavior, and more widely birds' phenologies, can be identified by their oxygen isotopic values, but only in certain cases, by comparison with local sedentary birds' isotopic signals.

Key-words : Migration, Isotopes, Oxygen, Bone, Histology, Extant birds, Fossil birds

^{*}Speaker



Étude des compositions isotopiques du calcium de l'os et de l'émail des cervidés, une piste pour étudier l'écologie et les stratégies de reproduction des mammifères modernes et fossiles

A. Hassler^{1*}, J.E. Martin¹, G. Merceron², M. Garel³, V. Balter¹

¹ Univ. Lyon, ENS de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1 – CNRS, UMR 5276 Laboratoire de Géologie de Lyon : Terre, Planètes, Environnement, F-69007 46 Allée d'Italie, Lyon – France

² Laboratoire de Paléontologie, Évolution, Paléoécosystèmes, Paléoprimatologie (PALEVOPRIM; ex-iPHEP) – UMR 7262 CNRS & Université de Poitiers, 86073 Poitiers Cedex 9 – France

³ Unité Ongulés Sauvages, Office Français de la Biodiversité (OFB; ex-ONCFS) – 5 allée de Bethléem, Z.I. Mayencin, F-38610 Gières – France

Les recherches sur les compositions isotopiques du calcium ($\delta^{44}\text{Ca}$) dans les tissus biologiques réalisées au cours des dernières décennies ont permis d'identifier un lien entre le $\delta^{44}\text{Ca}$ de l'hydroxyapatite (os et dents) et l'alimentation des animaux étudiés. Cette observation a permis de faire émerger un nouveau champ de recherche au sein duquel les compositions isotopiques du calcium sont utilisées pour identifier les réseaux trophiques des écosystèmes actuels et passés. Toutefois, la multiplication des études sur le sujet a également mis au jour un certain nombre de cas de mammifères pour lesquels le $\delta^{44}\text{Ca}$ de l'émail semble en partie décorrélié du niveau trophique de l'espèce. Ce phénomène a notamment été rapporté pour une population de rennes (*Rangifer tarandus*) du Pléistocène de la localité de Jaurens (Corrèze), ces cervidés montrant un $\delta^{44}\text{Ca}$ dentaire plus proche des carnivores de leur faune que des autres herbivores.

Afin d'identifier l'origine de ce phénomène, nous avons étudié une population moderne de cerfs élaphe sauvages (*Cervus elaphus*) provenant du massif des Bauges. En analysant les dents et les os de ces spécimens, nous avons détecté une variabilité importante du $\delta^{44}\text{Ca}$ dans l'émail, ainsi qu'une différence de composition isotopique entre mâles et femelles. Ces résultats corroborent des données précédemment publiées sur des dents de lait humaines et des ossements de mouton domestique, et semblent être la conséquence de la production et de la consommation de lait par les individus. En combinant ces deux observations et en balayant le spectre des autres phénomènes physiologiques et comportementaux pouvant affecter le $\delta^{44}\text{Ca}$ des cervidés, nous avons mis au point une méthode permettant d'extraire un signal représentatif de leur niveau trophique. Les nouvelles données collectées en appliquant cette méthode aux rennes de Jaurens présentent un $\delta^{44}\text{Ca}$ compatible avec un régime alimentaire herbivore, ce qui tend à confirmer l'efficacité de la méthode. Enfin, nos données suggèrent que dans certaines conditions, il est possible d'utiliser les isotopes du calcium pour identifier l'âge de sevrage et la dynamique de reproduction d'espèces actuelles et fossiles.

Mots-Clés : Isotopes du calcium, Écologie, Niveau trophique, Alimentation, Stratégie de reproduction, Sevrage, Cervidé, Mammifère



Utilisation du déficit en radiocarbone dans la végétation comme bio senseur du dégazage du CO₂ par le sol, exemple : La Solfatara (Naples, Italie)

Jean-Claude Lefevre^{1*}, Pierre-Yves Gillot², Giovanni Chiodini³, Carlo
Cardellini⁴, Christine Oberlin¹

¹Univ Lyon, CNRS, ARAR UMR 5138 – Centre de Datation par le Radiocarbone, Villeurbanne, France. ²Université Paris Saclay – GEOPS, Université Paris Sud – CNRS, Orsay, France.

³Università di Perugia – Dipartimento di Fisica e Geologica, Perugia, Italy.

⁴Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia Sezione di Bologna INGV, Bologna, Emilia-Romagna, Italy.

La mesure du flux du CO₂ au sol est une méthode clé qui peut être utilisée pour surveiller les risques dans une zone volcanique active. Afin de déterminer avec précision les variations de l'émission du sol CO₂, nous proposons une approche basée sur la carence en radiocarbone (¹⁴C) enregistrée dans les plantes qui poussent dans et autour de la Solfatara (Naples, Italie). Pendant près de trois ans, deux fois par an, nous avons échantillonné des poacées sélectionnées dans 17 sites définis autour du volcan Solfatara. Des mesures de radiocarbone par comptage à scintillation liquide (LSC) ont été réalisées sur les échantillons d'herbe. La carence en ¹⁴C déterminée dans les plantes échantillonnées, par rapport à l'activité de l'atmosphère ¹⁴C a varié de 5,0 à 50,3 %. Nous avons ensuite comparé la proportion de flux magmatiques CO₂ déduite aux mesures instantanées des flux CO₂ du sol effectuées par la chambre d'accumulation CO₂ mesuré de dégazage au moment de l'échantillonnage sur chaque site. La détermination de la carence des plantes en radiocarbone fournit une estimation sur quelques mois du taux moyen de CO₂ d'origine volcanique, ceci en intégrant les variations de dégazage du CO₂ du sol et les incidences météorologiques. Il peut donc devenir un biocapteur efficace et peut être utilisé comme un substitut à la cartographie CO₂ du dégazage des sols et pour déterminer ses variations dans le temps.

Bibliographie : Lefevre, J., Gillot, P., Cardellini, C., Gresse, M., Lesage, L., Chiodini, G., & Oberlin, C. (2018). Use of the Radiocarbon Activity Deficit in Vegetation as a Sensor of CO₂ Soil Degassing: Example from La Solfatara (Naples, Southern Italy). *Radiocarbon*, 60(2), 549-560. doi:10.1017/RDC.2017.76

Mots-Clés : Radiocarbone, CO₂, volcanisme, bio senseur, Solfatara, dégazage



Modifications de la composition isotopique du magnésium chez des cochons nains atteints de diabète de type 2 (DT2).

Samuel Le Goff^{*1}, Emmanuelle Albalat ¹, Jean-Philippe Godin ², Vincent Balter ¹

¹ École Normale Supérieure de Lyon, CNRS, UMR 5276, LGLTPE, Lyon, France

² Netslé Research, Lausanne, Switzerland

Le magnésium (Mg) est un élément bioessentiel impliqué dans de nombreux processus physiologiques. C'est le deuxième cation intracellulaire le plus abondant et le quatrième élément minéral le plus abondant dans le corps humain. Il joue un rôle crucial dans le métabolisme des glucides et l'action de l'insuline. Il a été démontré qu'une carence en Mg est associée au DT2 (1) (2). La disponibilité du Mg^{2+} est d'une importance majeure pour la régulation de nombreuses enzymes impliquées dans le métabolisme du glucose, ce qui pourrait expliquer son rôle dans le DT2 (3). L'apport de la mesure de la composition isotopique en Mg par rapport aux concentrations dans le sérum a été démontré par Grigoryan et al. en 2019 (4) pour discriminer les individus diabétiques des personnes saines.

Nous avons mesuré la composition isotopique du Mg dans différents organes (i.e. foie, rein, cœur, muscle gastrocnémien) et plasma de cochons nains sains et atteints de DT2 (obèses et insulino-résistants), comme outil alternatif à l'étude du diabète. Nous utilisons la spectrométrie de masse à multicollection à plasma couplé à induction (MC-ICP-MS), après avoir isolé le Mg à l'aide de résines échangeuses d'ions : AG1-X8 et AG50W-X12.

Nous montrerons ici un enrichissement en ^{24}Mg dans les organes et le plasma des spécimens diabétiques par rapport à ceux des contrôles. Cette variabilité pourrait être liée à la cinétique transcellulaire du Mg, et aux caractéristiques inhérentes des individus ; telles que : 1°) le contrôle variable de la glycémie, 2°) les différences dans le fractionnement des isotopes du Mg au sein de l'absorption intestinale, 3°) et/ou de l'excrétion rénale, 4°) et/ou dans la distribution différentielle des isotopes du Mg dans les compartiments corporels entre diabétiques et contrôles. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour identifier le(s) facteur(s) déterminant(s) de la répartition des isotopes du Mg entre les organes d'un individu.

1. *Hypomagnesaemia in type 2 (non-insulin-dependent) diabetes mellitus is not corrected by improvement of long-term metabolic control.* **Schnack, C. H., Bauer, I., Pregant, P., Hopmeier, P., & Scherthaner, G.** 1992, *Diabetologia*, pp. 35(1), 77-79.

2. *Magnesium status and association with diabetes in the Taiwanese elderly.* **Wang, J. L., Shaw, N. S., Yeh, H. Y., & Kao, M. D.** 2005, *Asia Pacific journal of clinical nutrition*, p. 14(3).

3. *Magnesium in man: implications for health and disease.* **De Baaij, J. H., Hoenderop, J. G., & Bindels, R. J.** 2015, *Physiological reviews*.

4. *Multi-collector ICP-mass spectrometry reveals changes in the serum Mg isotopic composition in diabetes type I patients.* **Grigoryan, R., Costas-Rodríguez, M., Van Laecke, S., Speckaert, M., Lapauw, B., & Vanhaecke, F.** 2019, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, pp. 34(7), 1514-1521.

Mots-Clés : Géochimie, Isotopes stables, Magnésium, Médecine, Géo-médecine, Biomarqueurs,

*Intervenant



Cartographie de la signature isotopique (ISOSCAPE) des pluies en Corse (Méditerranée occidentale) : implications sur la connaissance des mécanismes climatiques à diverses échelles

Bertil Nlend ^{*1,2}, Frédéric Huneau ^{1,2}, Emilie Garel ^{1,2}, Sebastien Santoni ^{1,2},
Alexandra Mattei ^{1,2}

¹ Département d'Hydrogéologie, Université de Corse Pascal Paoli, Faculté des Sciences et Techniques, Corte - France

² UMR 6134 SPE, CNRS, Corte – France

Depuis 2013, la signature isotopique des précipitations est suivie mensuellement sur 10 stations en Corse réparties à différentes altitudes et micro-régions climatiques afin d'étudier les mécanismes liés à la circulation atmosphérique régionale et locale. Une cartographie de la distribution spatiale des teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ (ISOSCAPE) dans la région est proposée pour chaque mois. Celle-ci repose sur une analyse multi-regressionnelle : " $\delta^{18}\text{O}$ - paramètres météorologiques" et " $\delta^{18}\text{O}$ - paramètres topographiques". Les "isoscapes" montrent que la variabilité spatiale de $\delta^{18}\text{O}$ est surtout contrôlée par l'orographie; notamment en raison des pentes aiguës. Plus la pente est forte, plus les précipitations sont appauvries en isotopes. Ce paramètre géomorphologique, renvoyant à l'encaissement des vallées reflète l'influence du microclimat sur la composition en isotopes des pluies. En effet, dans certaines zones bien encaissées du territoire, les masses d'air s'engouffrent plus longtemps, développant une forte humidité, à l'origine des faibles teneurs en isotopes inattendues sur des sites aux faibles altitudes. On observe par ailleurs des résultats singuliers en été avec des gradients altitudinaux positifs sur le versant ouest de l'île s'expliquant par (i) des effets de brise de pente et de vallée dominants la circulation atmosphérique en cette saison, (ii) le fait que le versant ouest en cette période ne reçoit plus d'air humide venant de l'ouest, mais se trouve sous les vents tyrrhéniens d'est. Enfin les valeurs résiduelles corrélées à l'excès en deutérium montrent pour certains mois de fortes relations positives traduisant le caractère appauvri de la pluie et reflétant une influence de l'activité convective sur les teneurs en isotopes. Ainsi dans cette étude, les isoscapes aident à mettre en évidence l'influence des phénomènes micro-climatiques et régionaux sur la signature géochimique des pluies.

Mots-Clés : Précipitation, Oxygène-18, Droites météoriques locales, effet d'altitude, isoscape, microclimat, Corse



Caractérisation par les isotopes du plomb des signaux anthropiques et naturels dans les poussières sahariennes : comparaison de deux méthodes d'extraction

Sylvie Philippe^{*1}, Aloys Bory¹, Charlotte Skonieczny², Meryll Le Quilleuc¹, Wolfgang Dörr³, Viviane Bout-Roumazielles¹, Jacinthe Caillaud¹, Déborah Ponlevé¹, Thierno Ndiaye⁴, Aboubacry Diallo⁴

1. Univ. Littoral Côte d'Opale, CNRS, Univ. Lille, UMR 8187 - LOG - Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, France
2. Laboratoire GEOSciences Paris-Sud (GEOPS), UMR CNRS 8148, Université Paris-Sud, Université Paris-Saclay, France
3. Institute of Geosciences, Goethe University, Allemagne
4. IRD, US191 IMAGO, Dakar, Senegal

Au cours du XX^e siècle, les émissions de plomb liées en particulier à l'activité automobile ont conduit à la contamination globale des écosystèmes (Patterson and Settle, 1987). Ainsi, la signature isotopique du plomb des poussières atmosphériques est généralement influencée par les activités anthropiques, et ceci même dans des régions fortement émettrices de poussières naturelles telles que le Sahara. Il est donc particulièrement délicat, à l'aide d'extractions chimiques peu spécifiques, de discriminer la signature naturelle du plomb de sa signature anthropique.

Dans ce but, deux méthodes d'extraction séquentielle du plomb anthropique ont été comparées : la première, d'après Kumar et al. (2014), prévoyant une étape de lessivage et la seconde adaptée de Hamelin et al. (1989) et Bollhöfer et al. (1999) avec leaching en deux étapes.

Les échantillons de poussières sahariennes ont été sélectionnés dans la série temporelle de M'Bour (Sénégal), en s'appuyant sur les travaux de Skonieczny et al. (2011 et 2013) et Le Quilleuc et al. (soumis). Ces échantillons présentent ainsi des origines géographiques distinctes, validées d'un point de vue géochimique (isotopes Sr, Nd et éléments en trace).

La méthode d'extraction du plomb anthropique en deux étapes s'est avérée être la plus efficace. Elle a permis de caractériser le signal isotopique moyen du plomb lithogène des poussières sahariennes au niveau de la côte sénégalaise et donc du matériel éolien exporté vers l'océan Atlantique tropical N-E. Ce signal isotopique est en bonne concordance avec les données obtenues sur les sédiments terrigènes de cette partie de l'océan Atlantique (Hamelin et al. (1997) et utilisées comme proxy dans les études de paléo-provenance (ex. Abouchami et Zabel, 2003).

La signature isotopique du plomb anthropique est plus complexe à interpréter, même si elle est assez proche de la signature urbaine maghrébine établie par Bollhöfer and Rosman (2000).

Mots-Clés : isotopes du plomb; poussières sahariennes ; extractions chimiques ; signatures naturelles et anthropiques



Variabilité intra-squelettique de la composition isotopique de l'oxygène du phosphate ($\delta^{18}\text{O}_\text{p}$) chez les vertébrés marins : quel impact pour l'estimation des paramètres océaniques passés ?

Nicolas Séon ^{1*}, Romain Amiot ², Sylvain Charbonnier ¹ & Peggy Vincent ¹

¹ Centre de Recherche en Paléontologie – Paris (CR2P) UMR 7207, CNRS, Muséum national d'Histoire Naturelle, Sorbonne Université – Paris, France

² Laboratoire de Géologie de Lyon -Terre, Planètes UMR 5276, et Environnement, Université Claude Bernard Lyon 1/CNRS/ Ecole Normale Supérieure de Lyon – Lyon, France

La composition isotopique de l'oxygène du groupement phosphate de l'hydroxyapatite ($\delta^{18}\text{O}_\text{p}$) formant les os, les dents et les écailles des vertébrés marins est un outil très utilisé pour les reconstitutions paléocéanographiques. Grâce aux équations de fractionnement phosphate-eau établies dans l'actuel, le $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ d'organismes ectothermes hétérothermes tels que les chondrichthyens et ostéichthyens permet de calculer des paléotempératures océaniques, et celui d'endothermes homéothermes (ex : cétacés) permet de retracer les variations de la composition isotopique de l'oxygène des océans ($\delta^{18}\text{O}_\text{sw}$). Toutefois, ces études reposent sur l'hypothèse forte et qui n'a jamais été testée, selon laquelle les compositions isotopiques de l'oxygène des éléments squelettiques sont homogènes au sein d'un individu et donc que le $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ d'un élément est représentative du squelette.

Le $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ des éléments minéralisés est dépendant de deux facteurs : la composition isotopique de l'eau corporelle de l'animal et la température de minéralisation des éléments squelettiques, c'est-à-dire la température corporelle de l'animal. Ainsi, un organisme hétérotherme devrait en théorie montrer une variabilité du $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ intra-squelettique plus importante qu'un organisme homéotherme. La réalisation de cartographies détaillées de la variabilité intra-squelettique du $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ d'organismes homéothermes (*Delphinus delphis*, *Cephalorhynchus commersonii*) et hétérothermes (*Thunnus thynnus*, *Xiphias gladius*) a permis de tester cette hypothèse. Les résultats indiquent des différences significatives du $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ entre les éléments minéralisés provenant des différentes régions anatomiques qui de plus, sont en adéquation avec les hétérogénéités de températures mesurées grâce aux méthodes de thermométrie.

Par conséquent, il est nécessaire de considérer dans les études futures la thermophysiologie des organismes étudiés et de contraindre l'amplitude de ce biais dans l'estimation de la paléotempérature océanique ou du $\delta^{18}\text{O}_\text{sw}$.

Mots-Clés : thermophysiologie, isotopes de l'oxygène, hydroxyapatite, vertébrés, paléocéanographie



In Situ carbon and oxygen isotopes measurements in carbonates using laser-induced calcination: A step forward field isotopic characterization

Christophe Thomazo ^{*1}, Pierre Sansjofre ², Olivier Musset ³, Théophile Cocquerez ¹, Stefan Lalonde ⁴.

¹ Biogéosciences, CNRS UMR6282, Université Bourgogne Franche-Comté, France

² MNHN, Sorbonne Université, CNRS UMR 7590, France

³ Laboratoire Interdisciplinaire CARNOT, CNRS UMR 6303, Université de Bourgogne Franche-Comté, France

⁴ Institut Universitaire Européen de la Mer, CNRS UMR 6538, France

Stable isotopes ratios ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$) of carbonates archived in the rock records are routinely used to reconstruct paleo-temperatures and the secular evolution of the biogeochemical carbon cycle through Earth History. The state-of-the-art technique, developed since the mid 19th century, to measure these isotopic ratios includes: micro-drilling and/or sawing and crushing, CO_2 release by wet acid digestion, gas equilibration, purification and transfer, before gas phase IRMS measurements. While these steps are time and resources consuming, they provide accurate measurements of the rock record.

This study presents a new protocol involving a laser calcination system that allows to decrease drastically the analyses time by reducing the number of preparations steps together with offering the possibility of performing punctual analyses at the mm scale. This original setting is based on the use of a fiber laser diode device emitting in near infrared at 880nm and inducing the decomposition of calcium carbonate into lime and carbon dioxide.

We analyzed 9 different types of carbonate encompassing a range of isotopic composition between -18.2 and +3.3 and between -1.7 and -14.6‰ for the $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ VPDB, respectively. The comparison of isotopic results is performed after both micro-drilling before acid digestion and laser calcination and considers samples isotopic inhomogeneity. The resulting isotopic cross-calibration shows a direct positive co-variation between both methods with a correlation coefficient of 0.99 and a regression slope of 1 within uncertainties for the $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$. The $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ also compared well with a correlation coefficient of 0.96 suggesting a constant gas-solid phases isotopic equilibrium. The reproducibility of our laser calcination method shows a 1σ standard deviation of 0.31 and 0.77 for the $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$, respectively.

We demonstrate that (i) laser calcination gives accurate and reproducible C and O isotopes characterization of carbonates, (ii) the physical effect during calcinations does not introduce any isotopic fractionation for C and is accompanied with a constant isotopic equilibrium of O. These findings paved the way to a renewed range of possibilities for carbonate isotopic measurements using rapid, punctual and easy to manipulate laser preparation device.

Mots-clés : stable isotope, carbonate, laser, punctual analyses



T10.3. Cartographie géologique et thématique innovantes : cartes, bases de données et diffusion des données



Cartographie prédictive semi-automatique des horizons d'altération au sein des roches plutoniques

Julien Baptiste^{*1}, Paul Bessin², Frédéric Lacquement¹, Hélène Tissoux¹, Anne Raingeard¹

¹ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

² Laboratoire Planétologie et de Géodynamique (LPG) UMR 6112, CNRS, Le Mans Université, 72085, Le Mans, France

La connaissance des formations issues de l'altération autochtone présentes sur le territoire de la France métropolitaine est incomplète et très hétérogène. Lorsque ces formations sont représentées en cartographie géologique, leur contour est très souvent imprécis et leur extension spatiale sous-estimée. Pourtant, les formations d'altération représentent une grande majorité des terrains rencontrés en surface dans les domaines de socle. Renforcer notre connaissance de ces formations, notamment leur répartition et leur nature, est primordial pour répondre aux besoins actuels dans de nombreux domaines tels que les risques naturels, l'hydrogéologie, l'aménagement des territoires ou encore les ressources minérales. Développer des approches numériques innovantes en vue d'aider à la cartographie et à la modélisation des formations d'altération autochtone en domaine de socle est apparu comme nécessaire, tant les surfaces à actualiser sont importantes.

La cartographie prédictive semi-automatique a déjà fait ses preuves pour la caractérisation des zones planes, que ce soit pour identifier les terrasses alluviales ou les surfaces d'aplanissement. Nous proposons ici de présenter le développement d'une méthodologie d'aide à la cartographie des horizons d'altération présents en surface. Cette méthode s'appuie sur un modèle numérique de terrain (au pas de 25m) ainsi que ces dérivées (pente, courbure, dénivelée et rugosité). La succession de traitement comprend plusieurs étapes : i) Analyses statistiques des paramètres pour les roches considérées, ii) Application d'un test de « logique floue », iii) Interprétation cartographique des profils d'altération et iv) Validation/correction par retour sur le terrain.

L'exemple développé concerne l'ensemble du profil d'altération des roches plutoniques de trois secteurs définis au sein du Massif armoricain, du Massif central et des Vosges. Les implications en terme d'histoire géologique et de cartographie seront discutées.

Mots-Clés : Altération, cartographie prédictive, Massif armoricain, Massif central, Vosges



Capitalisation des données géologiques, structurales et métallogéniques du Craton Ouest Africain : vers une meilleure compréhension de la distribution spatiale de l'or dans le craton

Célestine Berthier ^{*1}, Aurélien Eglinger ², Floriane Duret ¹, Renan Furic ¹, Rémi Bosc ¹

¹ Arethuse Geology EURL., BP 80017, Latitude Arbois, 1060 rue René Descartes, 13290 Les Milles, France

² GeoRessources, Université de Lorraine, CNRS, 54000 Nancy, France

Le Craton Ouest Africain (COA) est actuellement le réservoir majeur d'or protérozoïque, avec environ 10 000 t d'or de réserves estimées en 2017 et 9 gisements de classe mondiale, le plaçant parmi les plus grandes provinces aurifères mondiales. La très grande majorité des gisements connus sont de type orogénique, encaissés dans les volcano-sédiments et sédiments déformés et métamorphisés formant les ceintures de roches vertes d'âge Paléoprotérozoïque inférieur (Rhyacien). Cependant, la mise au jour de nouveaux types de gisement dans les autres domaines litho-tectoniques ainsi que la description de minéralisations complexes, polyphasées, conduisent à compiler et intégrer les connaissances géologiques et métallogéniques actuelles dans un schéma pétro-structural multi-échelle.

L'engouement pour l'or du COA est relativement récent (années 1990) et son exploration minière est donc encore partielle. La première synthèse géologique et métallogénique est publiée en 1989 par le BRGM. Son exploration s'accélère dans les années 2000 et de nombreux acteurs privés et entités de recherche, notamment via le programme international

« West African eXploration Initiative », ont produit une importante quantité de données permettant de réviser les concepts géologiques, métallogéniques et géodynamiques aussi bien à l'échelle du gisement qu'à l'échelle de la province.

L'intégration de ces nouveaux concepts aux cartes géologiques publiées à toutes échelles et à toutes époques, aboutit, après un exercice d'harmonisation et de réinterprétation, à une définition géodynamique des unités lithologiques et à une délimitation précise des grands linéaments structuraux et domaines litho-tectoniques associés à l'échelle du COA. La comparaison de cette carte harmonisée avec une base de données exhaustive des indices minéraux, aussi bien mines, projets d'explorations avancés et occurrences, permet de discuter du potentiel métallogénique de ces différents domaines plus clairement définis et délimités.

Mots-Clés : Craton Ouest Africain, synthèse de données, or, cartographie, métallogénie



Présentation de MINERVE, une solution SIG sous réalité virtuelle.

Jérémy Billant ^{*1}, Loïc Dornel ¹, Júlia Bozzinio ², Frédérique Leclerc ¹,
Javier Escartin ³

¹ Université Côte d'Azur, CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur, IRD, Géoazur, Valbonne, France

² University of Girona, Girona, Spain

³ Laboratoire de Géologie – CNRS UMR 8358, Ecole Normale Supérieure de Paris, Paris, France

Les études géologiques bénéficient aujourd'hui de données topographiques de résolution élevée que ce soit sur de grande étendue grâce au LiDAR/bathymétrie HR ou plus localement grâce à la photogrammétrie. Des modèles fidèles peuvent ainsi être étudiés à distance facilitant l'analyse à différente échelle et la cartographie. Néanmoins, l'analyse est effectuée à l'aide de SIG pour les MNT et souvent limitée à une vue en 2D nécessitant l'utilisation de raster dérivés (pente ou raster ombré). Que ce soit pour l'analyse de MNT ou de modèles 3D d'affleurement, les logiciels classiques limitent l'appréhension de l'échelle et de la géométrie des objets ainsi que leur relation dans l'espace.

Notre objectif est de créer une solution permettant la visualisation de MNT et modèles 3D d'affleurement dans un environnement en réalité virtuelle, et d'utiliser ces données pour l'analyse géomorphologique et géologique.

Le logiciel libre et gratuit MINERVE permet, à ce stade, la visualisation des données et le travail à l'échelle 1:1 dans un système géoréférencé. L'utilisateur peut ainsi se déplacer librement dans un environnement immersif en 3D qui comprend des données personnalisées. Des outils (règle, boussole) permettent des mesures similaires à celles réalisées lors de travaux géomorphologiques ou géologiques sur le terrain. La cartographie d'objets en 3D est réalisée avec un laser offrant une grande précision, l'utilisateur peut ainsi créer des pseudo shapefiles en utilisant les trois primitives graphiques (point, ligne, polygone) ; ces fichiers compatibles avec les logiciels SIG standard. Une interface utilisateur affiche aide et informations et un outil de téléportation empêche le mal des transports. Enfin, des fonctionnalités de « jeu en ligne » permettent le travail avec des collègues distants ou une classe dans un environnement partagé.

Les utilisateurs ayant testé ce logiciel sont enthousiastes et conviennent qu'il permet de mieux apprécier et comprendre la forme et la géométrie des objets étudiés. Il a également été utilisé pour présenter et expliquer des modèles 3D d'affleurements à des étudiants en master. Les développements ultérieurs porteront la solution pour d'autres casques et permettront la création et la gestion de plusieurs couches de fichiers.

Mots-Clés : Réalité Virtuelle, SIG, Géosciences



La cartographie géologique événementielle : un nouvel outil prédictif pour identifier les roches naturellement amiantifères, exemple des Pyrénées (France)

Florence Cagnard ^{*1}, Didier Lahondère ¹, Benjamin Le Bayon ¹, Aurore Hertout ¹,
Thierry Baudin ¹, Maxime Padel ¹, Jérôme Duron ¹, Juliette Stephan-Perrey ¹

¹ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

Les cartes géologiques événementielles, conceptualisées et réalisées dans le cadre du Programme « Référentiel Géologique de la France » (RGF), sont des cartes numériques qui permettent de retracer l'histoire géologique des objets représentés. Les roches acquièrent leurs caractéristiques (minéralogiques, structurales et texturales) à travers une suite d'événements qui leur sont propres, depuis leur genèse jusqu'à l'affleurement, en passant par tous les phénomènes de transformation qu'elles subissent (métamorphisme, déformation, altération). Au cours du projet RGF-Pyrénées la compilation de plusieurs milliers de ces événements géologiques en base de données, et leur assignation à des géométries, a permis de générer des cartes de ces événements géologiques.

Dans les Pyrénées, l'amiante existe à l'état naturel dans certaines lithologies, dont en particulier : les roches ultrabasiques ; les roches plutoniques et filoniennes basiques à intermédiaires et les marbres. Certains événements métamorphiques (hydrothermalisme, métamorphisme en faciès schiste vert, ...) vont rendre davantage probable la cristallisation de minéraux amiantifères dans ces roches.

Lors de cette étude, un traitement SIG appliqué sur les lithologies et les événements métamorphiques, a permis de produire une carte prédictive des lithologies potentiellement porteuses d'amiante naturel dans les Pyrénées. Un travail de cartographie sur le terrain couplé à des analyses en laboratoire (MOLP, microsonde électronique, MEB), s'est ensuite focalisé sur l'identification et la caractérisation des espèces minérales fibreuses présentes dans les roches échantillonnées. Le travail présenté ici, montre une carte de la susceptibilité de présence d'amiante naturel, à l'échelle 1/50 000, des Pyrénées.

Les résultats de cette étude soulignent: (i) l'importance de l'actinolite-amiante dans les roches doléritiques, et (ii) la présence de trémolite-amiante dans les skarns et certains marbres dolomitiques. Ce travail illustre une utilisation innovante de la cartographie géologique événementielle, comme puissant outil de prédiction. Cette approche sera utile dans un contexte d'évolution de la réglementation en France, qui dès la fin de l'année, imposera la recherche d'amiante naturel avant tout types de travaux, dans l'environnement naturel.

Mots-Clés : Cartographie événementielle, amiante naturel, Pyrénées.



Trois nouvelles cartes pédagogiques pour décrypter facilement l'histoire et les enjeux de nos environnements géologiques

Nicolas Charles ^{*1}, Frédéric Simien ¹, Gilles Dromart ², Emmanuel Egal ³, Franck Hanot ⁴, Frédéric Lacquement ¹, Benjamin Le Bayon ¹, Marie-Sophie Putfin ⁵, Florence Quesnel ¹,

¹ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

² LGL-TPE Lyon - France

³ Egis Tunnels – France

⁴ CPD Consulting - France

⁵ Légendes cartographie – France

Les cartes géologiques représentent la base de toute étude en lien avec les sciences de la Terre. Rien de mieux qu'une représentation spatiale du terrain pour exprimer la diversité des roches et leur arrangement en trois dimensions. Cependant, la bonne compréhension de ces documents demande un long apprentissage. Il fallait donc les faire évoluer de manière pédagogique pour les rendre accessibles à un large public en demande d'informations sur le sous-sol afin qu'il puisse bien comprendre l'organisation des roches et les différentes étapes de leur mise en place, avec selon les cas, leur déformation, leur exhumation et leur altération qui ont jalonné la longue histoire géologique.

De nombreux utilisateurs de cartes géologiques ne sont pas des experts sur le sujet (gestionnaires de territoires, bureaux d'études, vigneron, enseignants, naturalistes amateurs, etc.). Ils recherchent avant tout (1) la nature des roches présentes, (2) la présence de nappe d'eau souterraine et (3) les secteurs pouvant présenter des risques naturels (cavités, glissements, etc.). Avec les cartes traditionnelles détaillées, ces utilisateurs ne trouvent pas facilement les réponses à leurs recherches. Il nous a donc paru important de nous adapter pour répondre aux demandes d'une partie de nos utilisateurs/clients, et notamment du monde de l'enseignement où les cartes géologiques ont récemment réintégré les programmes scolaires.

Par rapport aux cartes classiques à l'échelle 1/50 000, ces nouvelles représentations du sous-sol rendent le modelé du relief plus lisible, synthétisent légèrement les unités cartographiées et proposent de percevoir directement leurs durées de formation, les hiatus et épisodes d'érosion, de déformation tectonique, les milieux de dépôt pour les roches sédimentaires, etc. Il est également possible de visualiser directement pour les mêmes niveaux les ressources minérales et leurs usages, les aquifères et aquitards, ainsi que la nature des risques naturels potentiels.

Le BRGM a initié cette nouvelle collection de cartes en proposant trois titres à la vente: Paris, Lyon et Sancerre-Pouilly. Les deux premières montrent l'évidence que l'emplacement des deux métropoles n'est pas fortuit. Elles sont situées au milieu de carrefours géologiques bien particuliers. Pour Paris, cela permet également de se rendre compte des aménagements qu'il a fallu réaliser pour apporter de l'eau potable aux habitants. Parfois, la lecture peut prendre l'aspect d'une anecdote amusante avec par exemple Pierre-Bénite près de Lyon qui correspond à un rare affleurement de granite qui représentait une "bénédiction" aux marins pour amarrer leurs bateaux. Pour la carte Sancerre-Pouilly, cela permet de faire immédiatement le lien entre les terroirs et les vignobles. Les spécificités des terrains les plus propices aux meilleurs crus apparaissent clairement.

Mots-Clés : Carte géologique, pédagogie.



DataGeol, un système de base de données versatile pour traiter et partager les données géologiques de terrain

Thomas Courrier* ^{1 2}, Phillipe Hervé Leloup *¹, Antoine Mercier ¹

¹ Laboratoire de Géologie de Lyon, Terre, Planètes, Environnement, CNRS 8 UMR 5276, Université Lyon1
– ENS Lyon, Villeurbanne, France.

² Université Grenoble Alpes, ISTerre, F-38058 Grenoble, France

La gestion des données géologiques est un enjeu majeur des Sciences de la Terre. En effet, les publications scientifiques proposent généralement des données déjà interprétées et synthétisées, empêchant le plus souvent l'accès aux données initiales. C'est une perte importante car de telles données pourraient être utilisées par d'autres groupes de recherche qui peuvent avoir des interprétations différentes. Il n'existe pas de système permettant à l'ensemble de la communauté scientifique de partager des données issues des différentes missions de terrain réalisées. Pour essayer de combler cette lacune, nous avons décidé de proposer un système de base de données qui puisse permettre un traitement efficace des données de terrain tout en étant suffisamment versatile et largement accessible.

Il est essentiel que les données soient organisées sous un format facilement consultable, modifiable et largement accessible. La base de données est codée en PostgreSQL, un format libre, largement utilisé dans la communauté des datasciences, interopérable et stable. L'utilisateur saisit ses données de localisation puis le contenu de ses observations de terrain dans des tables indépendantes. Le système génère ensuite d'autres tables dédiées à la visualisation et aux traitements des données: gestion des échantillons, mesures structurales (*Stereonet*), exportation vers des SIG (*Google Earth*, *QGIS*) ou vers des logiciels de modélisation tel que *GeoModellerTM* (développé par le BRGM), ou *PecubeTM*, etc. De plus, le format code PostgreSQL est parfaitement adapté au traitement des données spatiales, puisqu'une connexion directe et dynamique est possible avec *QGISTM*.

L'utilisation de la base de données DataGeol permet un archivage, une visualisation, un traitement efficace des données, ainsi qu'une mise à jour de leur attribution au cours de leur analyse (e.g. attribution à des formations géologiques en fonction du type de représentation) ; et surtout leur partage entre divers utilisateurs. Elle est ainsi facilement adaptable à des besoins spécifiques.

Mots-Clés : Base de donnée, SIG



Construction de cartes de routage sédimentaire dans le cadre d'une approche « source-to-sink » en contexte anorogénique: l'exemple de la France au Paléogène

François Guillocheau¹, Cécile Robin¹, Justine Briais², Paul Bessin³ et Eric Lasseur²

1 : Univ Rennes – CNRS, Géosciences-Rennes, UMR 6118, 35000

Rennes 2 : Bureau de Recherche Géologiques et Minières (BRGM),
45000 Orléans

3 : LPG - Laboratoire de Planétologie et Géodynamique (UMR 6112) et Le Mans Université

La compréhension du système sédimentaire dans son intégralité, de la source des sédiments aux dépôts ultimes dans les plaines abyssales ou dans les lacs, est devenue incontournable pour comprendre les effets de la déformation lithosphérique à toutes ses longueurs d'onde et du climat sur le système sédimentaire.

Nous avons développé une méthode de reconstitution de cartes de routages sédimentaires, intégrant les zones (1) en érosion (relief...), (2) en transfert et (3) en sédimentation.

LA ZONE EN SEDIMENTATION

Ce sont des cartes de faciès « classiques » dont la qualité dépend de la datation des sédiments et de l'interprétation sédimentologique ou paléocéologique des faciès. Un soin particulier est porté à l'identification de l'onlap côtier (en fait celui de la plaine côtière ou « ligne de baie » / « bayline »).

LA ZONE EN EROSION

Les reliefs des zones en érosion sont déduits de l'analyse géomorphologique des domaines anorogéniques (plateaux *s.l.*) et des formes du reliefs étagées associées : les pédiments ou pédiplains et les surfaces de corrosion (« etchplain »), souvent des pédiplains altérés perchés. Ces formes étagées du relief sont datées de trois manières : (1) par la datation des altérites, (2) par l'âge des sédiments qui les recouvrent ou (3) par leurs relations géométriques avec du volcanisme daté. Ces formes étagées du relief sont ensuite restaurées dans leur état à l'époque considérée, en supprimant le déplacement vertical contemporain des formes plus jeunes du relief, résultant d'une surrection (« surface uplift ») entre l'actuel et la période considérée.

Les bassins versants sont définis en reliant les points les plus hauts des reliefs ainsi reconstitués. Les points bas permettent de tracer les drains préférentiels de transport (pédiments de type pédivallées ou vallées incisées) des sédiments érodés et/ou d'érosion active.

LA ZONE EN TRANSFERT

Les zones de transfert sont des plaines situées entre la limite de la zone en érosion (souvent le pied de l'escarpement amont de la pédiplaine la plus récente par rapport à la période considérée) et (1) l'onlap côtier ou (2), si la plaine alluviale est en aggradation, le biseau amont des sédiments fluviaux *s.l.*. La localisation des drains alluviaux (des rivières uniques ou des distributaires multiples) est déduite de placages résiduels possiblement préservés.

Mots-Clés : paléogéographie, routage sédimentaire, érosion, transfert, sédimentation



Vers une intégration SIG et modélisation géologique (3D)

Thomas Janvier¹, Simon Lopez^{*1}, Antoine Mercier², Philippe Calcagno¹

¹ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

² Laboratoire de Géologie de Lyon – Terre, planètes et environnement (LGL-TPE) – CNRS : UMR5276, Université de Lyon - France

La construction d'un modèle géologique est une étape incontournable pour une analyse quantitative et prédictive du sous-sol qui permet de contraindre la distribution spatiale de ses propriétés. Généralisant la démarche cartographique en 3D, elle intègre autour d'un même objet géologique, des compétences multiples et des concepts variés. La représentation et l'analyse spatiales des données et résultats sont ainsi des éléments clés du processus. Les outils de SIG modernes sont ici des aides de choix comme agrégateurs de flux de données et boîtes à outils de traitement. S'ils pêchent encore par leurs capacités d'interaction limitées en 3D (coupes et rendus 3D), ils sont largement utilisés avec une communauté d'utilisateurs très dynamique. De plus, une approche modulaire permet de concentrer le développement de fonctionnalités métiers dans des extensions légères (*plugins*).

La modélisation implicite s'est imposée comme l'approche de choix pour la modélisation géologique structurale. Nous avons donc réalisé un prototype portant la méthode de modélisation géologique par champ de potentiel implémentée dans l'outil GeoModeller, vers QGIS. Cette initiative, se veut complémentaires d'autres et est basée sur la réalisation de briques logicielles compatibles pour interpoler et assembler des surfaces en un modèle géologique cohérent, et représenter ce modèle à une précision arbitraire en 2D ou 3D. Nous améliorons au passage la méthode initiale et remplaçons la notion de pile géologique par un arbre binaire. Cet arbre est exploité récursivement pour discrétiser un modèle ou raffiner un objet maillé en y insérant les interfaces de formations.

L'ensemble de ces fonctionnalités est accessible *via* une extension QGIS qui permet de produire des coupes et écorchés du modèle géologique ou de le représenter sur un maillage existant (galeries...). Nous montrerons également comment le modèle géologique peut être modifié en y injectant de nouvelles données depuis QGIS ou une base de données externe.

Mots-Clés : modèle géologique, SIG, QGIS, cartographie, maillage



RESQML v2.2 : un format d'échange des données et des modèles géologiques en 3D pour les géosciences

Jean-Marie Léonard^{*1}, Jean-François Rainaud²

¹ EGIS Géotechnique - 3 rue du Dr Schweitzer, 38180 SEYSSINS- France

² GEOSIRIS – 1 Avenue Pasteur, 78112 FOURQUEUX, Saint GERMAIN en LAYE - France

Le format RESQML a été créé par le consortium Energistics afin de permettre l'échange d'informations concernant les réservoirs de pétrole et de gaz entre logiciels de géomodélisation tels que GoCAD-SKUA, Petrel ou EarthVision. En fait, il permet de stocker l'ensemble des informations de n'importe quel modèle 3D du sous-sol, et pas seulement des modèles de réservoirs. Il peut contenir différentes interprétations du modèle et toutes les données de sondages et de mesures faites in situ ou en laboratoire. Tout logiciel capable d'importer et d'exporter le format RESQML peut alors contribuer à l'amélioration du modèle 3D, en l'enrichissant de nouvelles données, en y ajoutant de nouvelles interprétations et de nouvelles représentations.

Le format RESQML n'est pas un format propriétaire. Son utilisation est libre de droit. Les spécifications du format RESQML sont disponibles sur le site d'Energistics et des librairies decode (API) dans divers langages sont mises gratuitement à la disposition des développeurs.

Le format RESQML malgré son origine n'est pas réservé à l'industrie pétrolière. Il peut être utile aussi à l'industrie minière, le génie civil et la géotechnique en particulier et les géosciences en général. Editeurs de logiciels commerciaux, développeurs indépendants, ingénieurs, chercheurs et étudiants peuvent librement ajouter des fonctionnalités d'import et d'export à leurs logiciels ou à tout logiciel ouvert afin de pouvoir échanger leurs informations au format RESQML. Les entreprises, les laboratoires et les services publics peuvent aussi utiliser ce format pour récupérer, stocker et délivrer de la donnée géologique.

En ce qui concerne, les projets d'ingénierie civile, le segment geotechnique du groupe EGIS, a utilisé ce format pour transférer des modèles 3D réalisés avec GDM-Multilayer (édité par le BRGM) vers Autodesk Civil 3D et vers ArcGIS PRO (édité par ESRI) afin d'ajouter modèle 3Dgéotechnique et données de sondages à la maquette BIM (Building Information Modelling) et au serveur SIG dédié au projet.

Un autre intérêt du format RESQML réside dans le fait qu'il s'agit d'un format à haut niveau de sémantique parfaitement adapté aux géosciences et aux fortes volumétries de données nécessaire au stockage et au transfert interopérable des modèles 3D.

Dans cette communication, nous décrirons les principales caractéristiques du format RESQML v2.2, en abordant succinctement le modèle de données et en illustrant nos propos de modèles 3D de quelques projets étudiés par EGIS dont une étude qui a concerné un projet de nouvelle ligne de métro pour le Grand-Lyon.

Mots-Clés : Modélisation 3D, RESQML, Intéropérabilité, Génie Civil, BIM, SIG, Grand-Lyon



La carte géologique du régolithe de la France métropolitaine à 1/1 000 000, version 2021

Frédéric Lacquement ^{1, *}, Florence Quesnel ¹, Caroline Ricordel-Prognon ¹, Hélène Tissoux ¹, Aurore Hertout ¹, Anne Bialkowski ¹

¹ : BRGM, Direction des GéoRessources, Orléans, France

Depuis 2000, nous compilons les données sur les terrains géologiques les plus superficiels, qui résultent de processus supergènes, *i.e.* d'interactions chimiques et/ou physiques de la lithosphère en surface avec l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère. Ce sont les régolithes autochtone (altérites *sensu lato*) et allochtone (dépôts sédimentaires continentaux à côtiers). Nous synthétisons et restituons ces informations sous la forme de deux cartes géologiques numériques de la France métropolitaine à l'échelle du 1/1 000 000, consultables sur le site infoterre.brgm.fr dans la couche "Géologie de la surface".

Ces cartes sont utiles en amont des études dans les domaines des géosciences appliquées tels qu'aménagement des territoires (ruraux et urbains), environnement, gestion des risques et ressources de proche surface (0 à 100 m). Elles intègrent les données issues de deux sources principales : les cartes géologiques à 1/50 000 et les études publiées. Elles évoluent au fil du temps, au gré des parutions et de la collecte de nouvelles données. Elles intègrent progressivement les formats de production du Référentiel Géologique de la France.

La version d'origine (Lacquement et al, 2010) a été mise à jour en 2013 (Tissoux et al, inédit). La version 2021 inclut de nouvelles informations qui résultent des travaux de modélisation de la géométrie des formations meubles de surface sur les roches indurées (sédimentaires ou issues de l'altération du socle anté-triasique). Les travaux ont été réalisés à partir de l'interpolation des données de forages en Bretagne et *pro parte* dans les Pays-de-la-Loire (à la maille de 250 m).

La compilation des informations cartographiques disponibles permet d'aboutir à la fabrication des deux cartes géologiques identifiant la source des données (données de terrain ou modélisation géométrique). Une information est également fournie sur le degré de fiabilité/qualité des données ayant permis de réaliser les cartes, avec une gradation en 5 niveaux, qui elle aussi évolue au fil des mises à jour.

Lacquement F., Prognon F., Prognon C., Courbouleix S., Quesnel F., Karnay G et Thomas E. avec la collaboration de Quinquis J.P., Martin P., Rambourg D. et Lebreton P. (2010)- Carte géologique du régolithe du régolithe de la France métropolitaine – Etat des lieux de la connaissance à 1/1 000 000.

Mots-Clés : Carte géologique à 1/1 000 000, régolithe autochtone, régolithe allochtone, compilation, synthèse, infrastructure géologique



La cartographie événementielle, une cartographie géologique évolutive et collaborative

Benjamin Le Bayon ^{*1}, Maxime Padel ¹, Benoit Issautier ¹, Florence Cagnard ¹,
Thierry Baudin ¹, Hélène Tissoux ¹, Frederic Lacquement ¹, Sandrine Grataloup ¹,
Caroline Prognon ¹, Aurore Hertout ¹, Juliette Stephan-Perrey ¹

¹ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

La dimension temporelle est une composante intrinsèque de la géologie. Toutes les roches résultent de processus de formation et de transformations qui se relayent dans le temps. Les cartes géologiques restituent l'état actuel des objets géologiques, pour ne représenter que le "faciès" dominant des roches. Elle privilégie, dans sa représentation, un événement marquant enregistré dans une roche (génétique ou de transformation) au détriment des autres. Ainsi, les roches altérées sont sous représentées au bénéfice de leur protolithe ; certains orthogneiss sont identifiés comme des granites ; des marbres figurent comme calcaires et les roches métamorphiques apparaissent avec leur faciès dominant. Le choix de la représentation cartographique est donc arbitraire et dépend de la finalité de la carte géologique, de son contexte de réalisation et de la sensibilité du géologue.

Aujourd'hui, les technologies numériques permettent de dépasser les limites imposées par la représentation graphique de la carte géologique. L'un des principes de la nouvelle carte géologique du Référentiel Géologique de la France (RGF) est de pouvoir intégrer toutes les caractéristiques d'une roche en fonction de son histoire géologique. Ce nouveau concept, développés dans le cadre du projet RGF-Pyrénées, est appelé "carte géologique événementielle".

Cette carte numérique s'appuie sur une base de données hiérarchisée contenant l'essentiel des événements affectant les roches et constitue le « Référentiel événementiel » des Pyrénées. Pour chaque polygone de la carte géologique RGF est associé un ou plusieurs événements. Cette approche permet ainsi, selon les besoins des utilisateurs, de décliner autant de produits cartographiques que nécessaire.

La carte événementielle laisse à l'utilisateur le choix de proposer sa propre interprétation, sans affecter la donnée brute et son organisation en base de données. Elle permet d'intégrer les nouvelles données, de défaire/faire de nouveaux liens entre ces données au gré des questions et progrès scientifiques.

Mots-Clés : Cartes événementielles, Référentiel Géologique de la France (RGF), Pyrénées



Faire évoluer la collecte de données géologiques sur le terrain pour construire la carte géologique de demain

Pauline Louis, ^{*1,2}, Pierre Saulet¹

¹ Institut Polytechnique UniLaSalle - France

² Cranfield University – School of Water, Energy, Environment – Angleterre

Le carnet de terrain est un outil de travail incontournable pour le géologue, permettant de conserver les données collectées. D'un point de vue pédagogique, il permet aux étudiants d'acquérir la méthodologie et la rigueur nécessaires au travail de terrain, en apprenant à organiser et rendre exhaustives les informations récoltées afin de pouvoir réaliser une carte géologique. Néanmoins, ce gisement d'information est difficilement exploitable à long terme, les étudiants repartant avec leurs carnets et les données étant ainsi perdues. Celles-ci pourraient pourtant être capitalisées par l'école, aussi bien pour la recherche que pour la pédagogie. La finalité de ce travail est de mettre au point un outil numérique permettant la valorisation des données géologiques de terrain.

L'utilisation d'un questionnaire géolocalisé disponible sur support mobile garantit une approche pédagogique et structurée pour l'acquisition des données. La stratégie de remplissage du questionnaire est la même que celle d'un carnet de terrain : du général vers le plus détaillé. Le contenu technique a été réfléchi avec une équipe d'enseignants chercheurs spécialisés en géosciences.

Le questionnaire est développé avec l'application Survey123 for ArcGIS et complète automatiquement une base de données spatiales. Le contenu de la base de données finale est visualisable via une carte d'affleurements interactive et évolutive dont les éléments sont interrogeables.

Des premiers tests d'acquisition de données avec cette méthode seront mis en œuvre dès septembre 2020. Les données stockées dans la base pourront être exploitées dans un cadre pédagogique en facilitant la création de camps de terrains virtuels en géologie. A plus long terme, la corrélation des données permettra d'améliorer nos connaissances géologiques des secteurs d'étude via des analyses statistiques.

Mots-Clés : collecte de données de terrain, Survey123 for ArcGIS, carnet de terrain, pédagogie, enseignement, webapplication, carte interactive, base de données, géologie de terrain

*Intervenant



Cartographie prédictive de la lithologie des formations superficielles à partir des données électromagnétiques : application à l'érosion des sols.

Caroline Ricordel-Prognon^{1, *}, Pierre-Alexandre Reninger¹, Julien Bernard¹, Frédéric Lacquement¹, Anne Raingeard¹, , Isabelle Bernachot¹

¹ : BRGM, Direction des GéoRessources, Unité Géologie de l'Aménagement des Territoires, Orléans, France

La lutte contre l'érosion des sols à Mayotte est l'un des enjeux majeurs pour la préservation de l'activité rurale et la protection du lagon et de sa biodiversité. Dans ce cadre un large projet a vu le jour nécessitant de travailler à partir de documents cartographiques renseignant la nature lithologique des formations présentes en surface. En effet, la connaissance des niveaux d'infiltration et leur variabilité ainsi que le degré d'érodibilité des matériaux présents en surface permet entre autres, d'identifier les zones sensibles, à protéger en priorité, mais également de caler certains paramètres physiques fondamentaux pris en compte dans la modélisation du ruissellement et de la production et du transport des matières minérales qui se retrouveront en suspension dans les eaux de ruissellement.

Afin de produire une carte pertinente permettant de répondre à la problématique, une analyse des données électromagnétiques acquises lors d'un levé aéroporté en 2010 couplée avec des observations fines de terrain, des traitements géomorphologiques et une expertise géologique ont été réalisés. La carte issue de ces travaux est une carte prédictive de la nature lithologique des roches présentes en surface à l'échelle de l'île à 1/10 000. La comparaison visuelle entre la carte géologique au 1/30 000 avec la nouvelle carte lithologique de surface (tranche 0-1m) au 1/10 000 permet de se rendre compte de l'amélioration significative de la précision des données de surface. Ce document peut ensuite être décliné en attribuant à chaque caisson de la carte lithologique des critères de susceptibilité à l'érodibilité et au ruissellement afin de répondre aux enjeux appliqués.

Mots-Clés : Cartographie prédictive, régolithe, électromagnétisme, érosion



La cartographie géologique aidée par les outils d'imagerie en 3D et de géomatique. L'application au volcan du Piton des Neiges, Ile de La Réunion.

Paquez Camille^{*1,2}, Famin Vincent¹, Villeneuve Nicolas^{1,3}

¹ Laboratoire GéoSciences Réunion, Université de La Réunion, Institut de Physique du Globe de Paris, France

² Austral Energy, Saint Pierre, La Réunion

³ Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise, La Réunion

Le Piton des Neiges est l'ancien volcan de l'Ile de La Réunion. Il est caractérisé par la présence de trois cirques (Cilaos, Mafate, Salazie), qui sont de larges dépressions en entonnoir évasé vers l'amont entaillant profondément l'édifice. Ces cirques ont été successivement interprétés comme d'anciennes calderas, comme des cicatrices de glissements d'ampleur, comme des structures volcano-tectoniques, ou comme liés à l'érosion régressive. La controverse scientifique n'a jamais été totalement tranchée, car la dimension des escarpements exclue l'acquisition de relevés géologiques par cheminement in situ.

Dans cette étude, nous avons eu recours à la stéréophotogrammétrie et à la géomatique pour contourner cette difficulté, en construisant des modèles 3D géoréférencés des zones difficiles d'accès (remparts, crêtes et fonds de rivière). La résolution d'échantillonnage de ces modèles 3D est de l'ordre de 20cm/px. A partir de ces modèles 3D, nous avons identifié et cartographié les unités et les discontinuités géologiques, en suivant leurs contours à partir des zones accessibles et reconnues sur le terrain. Cette cartographie est ensuite intégrée dans un SIG pour contribuer à une nouvelle carte géologique au 1/25000^{ème} dont la subdivision des unités est effectuée à partir des données géochronologiques existantes.

Notre nouvelle carte géologique permet d'éclairer l'histoire du volcan du Piton des Neiges sous un jour nouveau, car elle révèle une très bonne continuité des unités géologiques sur le contour des cirques excluant un mode de formation par mouvements verticaux de type calderas. Les trois cirques présentent en fait des histoires de genèses différentes, le nord de Mafate étant dominé par l'érosion régressive tandis que le reste des cirques est lié à des déstabilisations d'ampleur. Notre travail révèle notamment le rôle fondamental qu'exercent les unités bréchiques dans l'érosion atypique des cirques. Ces unités sont présentes essentiellement dans les zones les plus internes de l'édifice et leur faible résistance à l'érosion explique la forme des cirques. D'une manière plus générale, notre étude montre l'importance de combiner les différentes approches d'acquisition de données incluant l'imagerie en 3D et la géomatique pour la construction d'une carte géologique complète.

Mots-Clés : Cartographie, Géomatique, Stéréophotogrammétrie, Piton des Neiges, Ile de La Réunion



Cartographie géologique multi-échelle du régolithe autochtone en France métropolitaine : historique, enjeux et méthodes

Florence Quesnel ^{1,*}, Frédéric Lacquement ¹, Caroline Ricordel-Prognon ¹, Hélène Tissoux ¹, Yaël Guyomard ², Aurélien Leynet ¹, Frédéric Chêne ¹, Isabelle Bernachot ¹, Anne Bialkowski ¹

¹ : BRGM, Direction des GéoRessources, Orléans, France

² : DIMENC, Service Géologique, Nouméa, Nouvelle Calédonie

Le régolithe autochtone correspond aux profils d'altération météorique *in situ* de tous âges affectant tous substrats géologiques. Parfois fossilisés par des assises plus jeunes, éventuellement exhumés ensuite, ou parfois restés à l'affleurement, mais polyphasés, leur évolution est fonction des variations eustatiques, tectoniques ou climatiques.

Leur prise en compte dans les cartes géologiques est récente en France, alors qu'en Angleterre la cartographie géologique régulière se fait en bi-couche depuis longtemps et qu'en Australie les géologues étudient les altérites depuis plus de cent ans car elles concentrent des ressources minérales essentielles. Or le besoin de connaissances de ces terrains croît avec de nombreux autres enjeux sociétaux, dont ceux liés aux effets du changement climatique : aménagement des territoires, agriculture, foresterie, risques naturels, environnement, ressources en eau... Des informations cruciales manquent sur l'occurrence, la géométrie, les lithologies et propriétés physico-chimiques des différents horizons constituant les allotérites et isaltérites, notamment la minéralogie de leur phase argileuse et l'intensité des transformations depuis les roches initiales. La zone critique est également très souvent associée aux isaltérites, qui ne sont jamais cartographiées, lorsqu'elles sont présentes partout.

Seront présentés des exemples de cartes et modèles géologiques 3D, notamment dans le Bassin parisien et les socles adjacents, élaborés depuis les années 1990 en France à partir de données diverses, à des échelles allant du 1/10 000 au 1/1 000 000 et comportant parfois des études intégrées, des sauts d'échelle ou des tests de généralisation de contours. Seront illustrés les objets géologiques et les méthodes de travail, adaptés aux objectifs des études et tendant vers une démarche homogénéisée dans le cadre du RGF.

Qualité, quantité et répartition des données sont essentielles pour réaliser des cartes fiables. Cela passe nécessairement par l'établissement d'une typologie robuste, conditionnée par la compréhension des processus à l'origine des types d'altérites, de leurs liens avec l'évolution des reliefs et bassins corrélatifs, et par la reconstitution des étapes de leur développement.

Mots-Clés : Régolithe autochtone, Altérites météoriques, Carte géologique, multiéchelle, SIG, modélisation 3D, infrastructure géologique



L'électromagnétisme héliporté, un outil d'aide au géologue pour la cartographie du régolithe

Anne Raingeard ^{*1} - Julien Baptiste ¹ - Pierre-Alexandre Reninger ¹ - Vincent Bellier ¹
 -Frédéric Lacquement¹ - Maxime Padel ¹ - Caroline Prognon ¹ - Hélène Tissoux ¹ -
 Aude Nachbaur ¹

¹ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

La cartographie des roches présentes à la surface et leurs altérations (régolithe) est un élément indispensable pour l'aménagement des territoires. Elle est une référence pour des études telles que celles des glissements de terrains, de l'érodibilité des sols ou du retrait- gonflement des argiles. Au travers des différentes études menées par le BRGM, l'électromagnétisme héliporté s'est avéré être un outil pertinent, capable d'accélérer et de préciser cette cartographie. En effet, la méthode permet de couvrir de grands territoires, et ce, de manière homogène et avec une haute résolution. Les travaux réalisés ont montré une bonne cohérence entre l'image du proche sous-sol obtenue et les observations géologiques. Cette méthode est aujourd'hui utilisée comme un complément utile et une aide au travail du géologue, en particulier dans les environnements complexes tels que les contextes volcaniques tropicaux.

L'étude présentée ici s'inscrit dans le cadre de la réalisation de la carte du régolithe de la Martinique à 1/25 000, sollicitée par les autorités publiques (DEAL, 2019) pour la réalisation des cartes d'aléas glissements de terrain. Le traitement des données du levé aérogéophysique MARTEM (2013) a permis d'imager les contrastes de résistivité jusqu'à 200 m de profondeur. Ces informations ont été utilisées afin d'appuyer la cartographie géologique.

En effet, les données d'électromagnétisme héliporté servent notamment à contraindre les continuités des lithologies observées ponctuellement en surface et facilitent donc le dessin des contours des cartes géologiques. Elles permettent d'optimiser le temps nécessaire à cartographier, et ce, particulièrement lorsque les roches sont peu affleurantes ou les zones difficiles d'accès. Ces données permettent également d'imager les continuités et discontinuités en profondeur et latéralement (pendage des couches, superpositions, stratification, la présence de grandes failles, etc...).

Enfin, et plus particulièrement dans le cas d'altérations fortement développées, les données d'électromagnétisme apportent de précieuses informations sur les structures ainsi que sur la roche saine, en profondeur. Ainsi la confrontation des données géophysiques avec les observations du géologue permet d'apporter une aide substantielle pour définir les grands ensembles géologiques.

Mots-Clés : Cartographie géologique – Régolithe – Géophysique – Electromagnétisme héliporté



Présentation de quelques cartes de synthèse d'échelle 1/50 000 couvrant l'emprise du chantier RGF Alpes et bassins périphériques

Denis Thiéblemont^{1*}, Charles Cartannaz¹, Yannick Callec¹, Monique Terrier¹

1 : Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

Produire des cartes numériques de synthèse d'échelle 1/50 000 permettant des requêtes sur des items prédéterminés et accessibles à un large public est l'une des premières priorités du chantier RGF - Alpes et bassins périphériques.

Ce chantier couvre totalement ou partiellement 12 départements, incluant de l'ordre de 125 cartes géologiques au 1/50 000. Celles-ci sont toutes achevées en 1^{ère} édition, et en 2^{ème} (voire en 3^{ème}) pour quelques-unes. La majeure partie a été publiée dans les années 70-80 et les plus récentes entre 2013 et 2015. Malgré ces différences de millésime, la représentation du substrat y est relativement cohérente. En revanche, de fortes différences apparaissent pour les formations superficielles, qui traduisent des conceptions souvent très opposées des dynamiques de dépôt des sédiments quaternaires selon les auteurs.

Une première intégration des cartes départementales sur l'ensemble du chantier a permis de produire une carte numérique du substrat et d'en coder l'information en termes de lithologie, stratigraphie et zonéographie géologique. Parallèlement, un travail sur la cartographie des failles est mené. Il concerne l'identification des accidents de premier ordre (i.e. ceux reportés sur les schémas structuraux des cartes au 1/50 000) et leur appellation. Une compilation des données géochronologiques sur les roches du socle a également été entreprise avec pour première cible les âges de mise en place (protolithes).

Les codifications réalisées permettent des études thématiques sur les différents items et des croisements entre ceux-ci. Une première carte des zones/domaines alpins d'échelle 1/50 000 a ainsi été produite. Elle permet d'extraire par simple requête, la lithostratigraphie propre à chaque entité.

Plusieurs cartes, issues de traitements sous SIG, sont présentées sous forme de posters. Elles ont pour but de faciliter l'échange sur la pertinence de la démarche et les améliorations à y apporter pour un traitement événementiel de la géologie alpine.

Mots-Clés : Chantier RGF Alpes et bassins périphériques ; Alpes ; Cartographie numérique ; Systèmes d'information géographique ; Lithologie ; Stratigraphie ; Tectonique



Classification Automatique des Environnements Géologiques pour la Cartographie Prédictive

Alex Vella ^{*1-2}, Charles Gumiaux ², Guillaume Bertrand ¹⁻², Vincent Labbé ¹

Bruno Tourlière ¹, Eric Gloaguen ¹⁻²

¹ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – Orléans, France

² Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (UMR 7327 - Univ. d'Orléans, CNRS, BRGM) - Orléans – France

Pour estimer les emplacements les plus favorables à la présence de minéralisations, la cartographie prédictive minière requiert le traitement de données cartographiques géologiques. Dans le cadre du projet AUREOLE, la production de cartes de favorabilité couvrant la zone ibéro-armoricaine utilise notamment la méthode CBA (« Cell-Based Associations ») se basant sur la classification automatique d'associations de facteurs lithologiques, structuraux, géophysiques et/ou géochimiques. Ce projet a pour objectif d'améliorer certains aspects de cette méthode, comme la recherche des associations et leur classification automatique. Ces travaux seront valorisés par l'analyse cartographique automatique, notamment la réalisation de schémas structuraux ou l'harmonisation de cartes géologiques.

Pour analyser les associations locales, l'espace cartographique est découpé en une grille régulière à mailles carrées, de taille suffisante pour contenir des associations représentatives. Cette segmentation induit une perte de résolution et un biais vis-à-vis de l'anisotropie des données cartographiques. Ces défauts peuvent être minorés en identifiant les associations avec des disques de recherche, centrés sur la grille et se chevauchant partiellement, plutôt que sur la seule surface des cellules. On obtient ainsi une résolution plus fine tout en conservant une représentativité des associations contenues.

Le nombre d'associations pouvant être supérieur au nombre de lithologies présentes, il faut utiliser des outils de classification automatique pour mettre en valeur les regroupements les plus significatifs. L'utilisation combinée de méthodes d'analyse de données multivariées qualitatives (Analyse des Correspondances Multiples) et de méthodes de classification (Classification Ascendante Hiérarchique) permet d'obtenir un nombre de classes significatives inférieur au nombre d'associations possibles pour une zone donnée.

Ce travail de thèse est financé par le projet AUREOLE (ANR-19-MIN2-0002).

Mots-Clés : Cartographie Géologique, Prédictivité, Classification



T10.4. Minéralogie terrestre et extraterrestre : apport de la nano- échelle



From local equilibria to fluid channelization in low-grade shear zones: evidence from the link between chloritization mechanisms at the nanoscale and compositional heterogeneities at micron scale

Laura Airaghi^{1,2*}, Benoit Dubacq¹, Anne Verlaquet¹, Franck Bourdelle³,
Nicolas Bellahsen¹, Alexandre Gloter⁴

1 Sorbonne Université, CNRS-INSU, Institut des Sciences de la Terre de Paris

2 Université d'Orléans, CNRS, BRGM, Institut des Sciences de la Terre

d'Orléans³ Université de Lille, IMT Lille, Laboratoire de Génie Civil et géo-

Environnement⁴ Université de Paris-Saclay, CNRS, Laboratoire de physique du Solide

Fluid percolation in low-grade shear zones is often accompanied by the growth of phyllosilicates, which influence rock strength and strain localisation. The composition of these phyllosilicates is frequently used for pressure-temperature-time constrains of deformation events, although it is often highly heterogeneous, even in mylonites. This study investigates the reactions producing phyllosilicates (chlorite in particular) in a low-grade shear zone of the Variscan Bielsa granitoid (Axial Zone, Pyrenees). Chlorite compositional heterogeneities at micrometer scale, including iron speciation obtained by XANES-STXM and EELS, is compared to nanostructures observed by transmission electron microscopy in increasingly-strained samples and related to fluid percolation mechanisms. The undeformed but altered Bielsa granitoid exhibits local equilibria, pseudomorphic replacement of amphibole and biotite and high compositional heterogeneities (included Fe^{3+}) in late Variscan chlorite. This is due to variable chloritization reaction mechanisms at nanoscale (dissolution-reprecipitation and layer-by-layer substitution), each of them related to different element supply and to the formation of poorly connected nanoporosity (as ripplocation or nanopores). Such features point to a fluid limited to local reservoirs in undeformed rocks. In samples with discrete mm-sized fractures, high fluid/rock ratio triggers the precipitation of Alpine chlorites in fractures from a free channelized fluid, with no re-equilibration of late Variscan ones outside the fractures walls, down to the nanoscale. In mylonites, fluid percolates in micro and nanocracks mainly located at the rims of chlorite crystallites, bended and partially dissolved. This promotes pervasive compositional replacement (included Fe^{3+}) of late Variscan chlorites by Alpine ones at micrometer scale. However, chlorite replacement remains incomplete in mylonites, despite the high strain and the grain size reduction. Therefore, in the studied shear zone, local equilibria and high compositional heterogeneities in chlorite are preserved according to matrix-fracture porosity contrasts, the location and connection of nanoporosity between crystallites of chlorite and the size of cracks enhancing pervasive fluid percolation.

Key words : Greenschist-facies shear zone, XFe^{3+} , chloritization reactions, TEM, Bielsa, Pyrenees



Caractérisation de la microstructure des matériaux minéralogiques hétérogènes à la nano-échelle par imagerie ptychographique aux rayons-X cohérents

Julio da Silva ^{*1,2}, Nils Blanc ^{1,2}, Olivier Proux ^{1,2}, Isabelle Kieffer ^{1,2},
Nathalie Boudet ^{1,2}, Yves Joly ¹, Jean-Louis Hazemann ^{1,2}

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, Institut NEEL UPR2940 – France

² Lignes de lumière CRG françaises à l'ESRF – France

Les propriétés des matériaux minéralogiques sont fortement affectées par la disposition des différents composants dans leurs microstructures 3D. La capacité de les visualiser avec une sensibilité élevée et une résolution spatiale nanométrique aide à mieux comprendre leurs fonctionnalités. Nous montrons ici que la tomographie-ptychographique aux rayons X (PXCT) est la méthode clé de nano-imagerie 3D pour réaliser cette caractérisation [1-5]. Les images 3D fournissent la localisation des différents composants, l'espace poreux de catalyseurs industriels à base de zéolithe, kaolin et alumine [1,2,3], et la composition de chaque matériau constituant le matériau [4,5]. Nous présenterons également les résultats de son application à la caractérisation quantitative du ciment hydraté. Nous avons analysé l'hydratation de l'alite, le principal composant du ciment ordinaire mais hautement polluant, et l'hydratation de l'ye'elemite combiné avec le gypse, ce qui constitue un possible candidat plus écologique pour remplacer l'alite. À partir des images 3D, la morphologie et la composition de chaque produit de l'hydratation, à l'échelle nanométrique, ont été obtenues, ainsi que la stœchiométrie de la réaction d'hydratation de l'alite [4] et l'ye'elemite [5]. Pour la première fois, les densités massiques du silicate de calcium hydraté (CSH) et du gel d'hydroxyde d'aluminium ont été extraites. En outre, nous développons une nouvelle méthode qui combine la ptychographie et les méthodes de spectroscopie (XANES) dans une seule méthode d'analyse. La ptychographie-spectrale permettra d'obtenir la localisation et l'état chimique des éléments dans la microstructure du matériau. Contrairement aux méthodes XAS conventionnelles, nous pouvons corrélérer localement la fonctionnalité des éléments à la microstructure de l'échantillon avec une résolution qui n'est pas limitée par la taille du faisceau. Les nouvelles propriétés de l'ESRF-EBS offrent la possibilité de mettre en œuvre la ptychographie-spectrale sur les lignes de lumière CRG françaises avec des financements Equipex et ANR récemment obtenus. Nous discuterons de ces nouveaux développements, les résultats préliminaires et leurs futures possibilités d'utilisation par la communauté.

References : [1] J. da Silva et al., ChemCatChem 7, 413 (2015), [2] J. Ihli et al. Nat. Communications 8, 809 (2017), [3] J. Ihli et al., Angewandte Chemie, Accepted Author Manuscript. doi:10.1002/anie.202008030 (2020), [4] J. da Silva et al., Langmuir 31, 3779 (2015), [5] A. Cuesta et al., J. Phys. Chem. C 121, 3044 (2017).

Mots-Clés : alite, ye'elemite, zéolithe, alumine, nano-imagerie, tomographie, rayons-X, ptychographie-spectrale



Atom probe tomography: (almost) ideal tool for the investigation of nanometer scale composition heterogeneities in (geological) materials

Frédéric Danoix ^{*1}, Emmanuel Cadel ¹, Fabien Cuvilly ¹, Raphaële Danoix ¹

¹ Groupe de Physique des Matériaux – CNRS - Université et INSA de Rouen - France

Atom probe tomography (APT) is an analytical microscopy, allowing sub nanometer scale investigation of composition heterogeneities in material. It initially derived from the combination of a field ion microscope – the first ever microscope to image individual atoms – with a time of flight (ToF) mass spectrometer. The outcome of the latest generation of instruments is an atomic scale 3D reconstruction of a sub-volume of the analyzed material (typically 50x50x500 nm³) located at the apex of a sharply pointed needle tip. With a detection efficiency reaching 80%, several tens, or even hundreds, of millions of atoms are chemically identified by their ToFs, with a mass resolution $m/\Delta m \approx 1000$. As the detection efficiency is the same for all chemical species from hydrogen to actinides, the analysis is quantitative, without prior calibration, and sensitivity can reach several ppm.

For physical reasons, the technique has long been restricted to conductive materials, almost exclusively metals. But at the turn of the century, the development of femto-second laser pulsing allowed its extension to semi-conductors and insulators. It is only in the last decade that its potential for geological materials has been recognized, and that seminal experiments made it essential when a combination of both elemental (or even isotopic) sensitivity and spatial resolution are required.

The preparation of non-conductive specimens suitable for APT analysis was only made possible by the concomitant development of focused ion beams (FIBs) columns and lift out techniques in scanning electron microscopes, allowing positioning the region of interest within the extreme apex region of APT tips.

It is clear that the combined use of APT and FIB in geological science is still in its infancy, and that much is yet to come. This presentation mainly aims at introducing the technique to a new community, and illustrating its potential on the basis of some selected experiments obtained by pioneer groups over the world.

Mots-Clés : 3D reconstruction; subnanometric scale resolution; elemental and isotopic analysis,



Localization of biomineral proteins by Atomic Force Microscopy(AFM) with functionalized tips

Benazir Khurshid ^{*1,2}, Eric Lesniewska ³, Daniel J. Jackson ⁴, Cédric Broussard ⁵, Jonathan Perrin ¹, Frédéric Marin ²

¹ Synchrotron SOLEIL, Saint-Aubin, France.

² UMR 6282 Biogéosciences, Univ. Bourgogne -Franche-Comté, Dijon, France.

³ Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB), Univ. Bourgogne -Franche-Comté, Dijon, France.

⁴ Geosciences Centre, University of Göttingen, Göttingen, Germany.

⁵ Plateforme protéomique 3P5, Université Paris Descartes, Paris, France.

Biominerals are organo-mineral structures produced by living systems. In the metazoan world, they contribute, since the Cambrian, to the adaptation of organisms to different environments by fulfilling a variety of functions that go along with adapted morphologies. One of the aims of biomineralization is to understand how organisms "sculpt" these complex morphologies at nano scale: we know that occluded organic matrix (OM) proteins influence the lattice parameters of biominerals (1) and that many of them strongly interact with the mineral phase as shown by *in vitro* assays, but their exact roles are still to be known. The aim of my PhD is to understand the complex relationships between the organic and mineral phases. In the present study, I discuss the case of the Mediterranean fan mussel *Pinna nobilis*.

Like all bivalves, *Pinna nobilis*, the Mediterranean fan mussel, envelops its soft body with a highly ordered shell composed of two mineralized layers: the internal nacreous one is made of aragonite, while the outer one is made of long calcitic prisms of apparent monocrystalline texture, that grow perpendicularly to the surface of the shell. The prismatic layer comprises an assemblage of insoluble periprismatic matrix and very acidic "intracrystalline" proteins and sugars, together with pigments. The objectives of our study are:

- 1) To characterize novel shell proteins: We have analyzed the intra and inter-prismatic OM by gel electrophoresis, ELISA test and western blot. A novel prism-associated protein - provisionally named CSP3 - was identified owing to a cDNA library and its full sequence was further confirmed by transcriptomics and proteomics.
- 2) To localize the novel shell protein in the biomineral. To this end, a polyclonal antibody was elicited against two CSP3 peptides, and tested for its specificity before being purified from the serum. To know the distribution of CSP3 in the prisms, we have functionalized AFM tips with the purified anti-CSP3 antibody via covalent binding. Treated prism surfaces were subsequently scanned with the functionalized tip and adhesion curves/maps were obtained. Interestingly, we have identified for CSP3 a remarkable protein pattern (double layer) at the interface between the periprismatic sheath and mineral, which significance is discussed here.

Conclusion: this work represents the very first attempt to map a protein in a biomineral, owing to functionalized tip-AFM. We assert that this novel approach will be extremely useful in geosciences for mapping at molecular level specific macromolecules in biogenic or sedimentary carbonates.

Keywords: Biomineral, calcium carbonate, mollusc, shell, organic matrix, AFM

1. Zolotoyabko E (2017) Anisotropic Lattice Distortions in Biogenic Minerals Originated from Strong Atomic Interactions at Organic/Inorganic Interfaces. 4(1):1600189.



Quantification des éléments légers (C, N, O) par EDS en microscopie électronique à transmission : composition de la matière organique et teneur en l'eau des phases altérées

Corentin Le Guillou^{*1}, Pierre-Marie Zanetta², Hugues Leroux¹, Maya Marinova³,
Anne-Marie Blanchenet¹, Francisco De La Peña¹

1: Unité Matériaux et transformation (UMET, UMR 8207), Université de Lille
2: Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, USA
3: Univ. Lille, CNRS, INRA, Centrale Lille, Univ. Artois, FR 2638 – IMEC – Institut Michel-Eugène Chevreul, F-59000 Lille, France

Jusqu'à récemment, il était difficile de quantifier les éléments légers par EDS dans un microscope électronique à transmission du fait de la sensibilité limitée des détecteurs aux basses énergies (< 1 keV). La nouvelle génération de détecteurs (silicon drift detector) possède une sensibilité améliorée dans cette gamme d'énergie.

Pour mettre à profit ces capacités, nous avons déterminé les coefficients de calibration (k-facteurs) de notre microscope (Titan Themis) pour le carbone, l'azote et l'oxygène en utilisant des standards variés (silicates, carbures, nitrure, matériaux organiques, etc...). Cependant, les rayons X de basse énergie sont particulièrement sensibles à l'absorption dans l'échantillon. Il est donc fondamental de déterminer l'épaisseur et la densité pour corriger de l'absorption. Pour cela, nous avons développé deux méthodes. La première est basée sur l'utilisation du rapport d'intensité des pics K et L (du fer par exemple). Le second étant plus absorbé que le premier, on détermine par une approche itérative le produit « épaisseur * densité » tel que la quantification par l'un ou l'autre des pics donne le même résultat. La deuxième méthode consiste à ajuster un modèle physique de la ligne de base couplant bremsstrahlung et absorption.

Les tests de sensibilité à différents paramètres montrent que l'oxygène peut être quantifié avec une précision de 3% environ, et le carbone et l'azote avec une précision de 5-10 %, en fonction des cas. L'ensemble de la procédure (calibration, algorithmes de quantification et de correction d'absorption) a été intégré à la librairie Hyperspy (<https://hyperspy.org/> ; analyse de données hyperspectrales, python).

Nous sommes donc en mesure, pour la première fois, de produire des cartographies quantifiées à la nano-échelle des ratios O/C et N/C de la matière organique, ainsi que de la teneur en eau de silicate amorphe (OH ou H₂O ; déduite de l'excès en oxygène) que l'on trouve dans les météorites.

Mots-Clés : EDS, microscopie électronique à transmission, matière organique, eau.



Etude expérimentale des interactions eau vapeur-silicates amorphe dans les chondrites

Morgano Maxime*, Le Guillou Corentin, Leroux Hugues

UMET – Unité Matériaux et Transformations - Université de Lille – France

Les chondrites sont les témoins de l'évolution des premiers stades du système solaire. Les plus primitives d'entre elles contiennent des silicates amorphes qui sont partiellement transformés en phyllosilicates (serpentine, saponite).

Le scénario standard de formation des phyllosilicates est qu'ils se sont formés en milieu aqueux dans le corps parent des météorites. Une alternative à ce modèle, serait que l'altération se fasse par interaction entre l'eau en phase vapeur et des poussières dans le disque proto-solaire. Jusqu'à présent cette option était considérée comme cinétiquement limitée. Toutefois, de récents résultats expérimentaux ont montré que l'altération des silicates amorphes dans le disque proto-solaire ($P_{H_2O} = 10^{-8}$ bar et $T < 225^\circ K$)¹ ou dans des environnements perturbés par des ondes de choc (Ou $P_{H_2O} = 58 \cdot 10^{-4}$ bar et $T > 1400^\circ K$)² pouvait être possible.

Nos travaux ont pour but d'étudier les mécanismes et cinétique d'altération par l'eau en phase vapeur de films minces de silicates amorphes. Notre objectif est d'étudier expérimentalement l'influence de la température et de la pression partielle de vapeur d'eau au sein d'autoclaves fermées et en conditions non-saturées. L'analyse des premiers échantillons par microscopie électronique à transmission a montré que des phases secondaires d'une centaine de nanomètres d'épaisseur se formaient en 12 jours et à $230^\circ C$ (13bar). Le fer et le magnésium ont migrés formant ainsi une couche riche en fer à la surface et une couche poreuse et plus riche en magnésium en profondeur. Ces résultats étendus à une plus large gamme de température doivent permettre de déterminer l'énergie d'activation de la réaction. Cela permettra de comprendre dans quelle mesure les interactions eau- vapeur/silicates ont pu contribuer à la formation des phyllosilicates au sein du disque proto- solaire.

¹(Fegley, 2000)

²(Ciesla, 2003)

Mots-Clés : Thermodynamique, cosmochimie, étude expérimentale, microscopie électronique



Intrication d'épisodes d'altération de zircon révélée à l'échelle atomique.

Anne-Magali Seydoux-Guillaume ^{*1}, Emilie Janots ², Stéphanie Reynaud ³,
et Marion Grosjean ²

¹ LGL-TPE – Lyon/Saint-Etienne - France

² ISTerre - Université Grenoble Alpes – France

³ LabHC – Saint-Etienne - France

Les récentes avancées de certaines techniques de caractérisation, telles qu'en particulier le MET corrigé des aberrations sphériques, permettent de sonder la matière jusqu'à l'échelle nanométrique. Les minéraux, mémoire des roches, qui nous renseignent sur la nature, l'intensité ou la durée des processus géologiques, préservent des traces souvent cachées et uniquement révélées à l'échelle nanométrique. Dans cette étude nous avons mis à profit le MET pour expliquer la complexité texturale et isotopique de cristaux de zircons du granite de la Lauzière. Ce granite est mylonitisé et rétro-morphosé en des paragenèses indiquant plusieurs épisodes d'altération, supposés à l'origine des indices uranifères situés à proximité du granite. Les âges et liens entre les circulations de fluides et les épisodes de déformations restent cependant incompris. Pour apporter des réponses nous nous sommes intéressés aux zircons de ces granites. Leurs caractérisations structurales et chimiques à l'échelle micrométrique (MEB, CL) ont révélé des structures complexes : des cœurs homogènes (1) avec un signal CL intense, parfois remplacés en cœurs très poreux (2) et riches en inclusions de thorites, et des bordures oscillatoires (3) avec un signal sombre en CL. Les datations U-Pb *in situ* révèlent que seuls les cœurs homogènes donnent des âges magmatiques autour de 340 Ma ; les autres domaines donnent des âges discordants ininterprétables avec ces seules données. L'analyse MET de coupes FIB préparées dans ces divers domaines permet d'apporter des pistes pour expliquer ces perturbations des âges. En particulier, elle révèle des cœurs (2) remplis de nanopores (20-50 nm) et de dislocations semblant progresser au détriment de cœurs (1) parfaitement cristallisés, et des bordures oscillatoires, montrant une alternance de fines bandes (50-200 nm) très riches en défauts d'irradiation et en U, et de bandes plus larges (0.5-2 µm) sans défauts et appauvries en U, pouvant expliquer les âges discordants.

Mots-Clés : zircon, altération, uranium, défauts nanométriques



Deciphering the volatile inventory of rocky planetary bodies using the NanoSIMS ion microprobe

Romain Tartèse ^{1,*}

¹ Department of Earth and Environmental Sciences, The University of Manchester, Manchester – United Kingdom

It is thought that inner Solar System rocky bodies mostly accreted dry, and that any water (and other volatiles) should have been lost from bodies that were once fully molten such as the Moon. And surely enough, studies of Apollo samples in the 70's failed to detect indigenous lunar water. However, this dry Moon paradigm has recently been overturned, thanks to continued analysis of lunar samples using modern analytical instrumentation, and notably NanoSIMS.

In 2008, Saal *et al.* [1] used NanoSIMS to show that the H₂O content (as well as F, Cl, and S) of a *ca.* 100 µm pyroclastic glass bead decreases from core to rim, indicating that these volatiles were indigenous, and were affected by degassing upon eruption. This breakthrough was permitted by the NanoSIMS high spatial resolution, typically 500 nm to 1 µm beam size rastered over *ca.* 5-10 µm² areas for volatile studies, and low H₂O backgrounds around 5-10 µg.g⁻¹. This has sparked numerous NanoSIMS-based measurements of volatile abundances (H₂O, C, F, Cl) and isotope compositions (H, Cl) in lunar volcanic glasses, apatite in varied lunar rock types, and melt inclusions they host [see 2]. Similar protocols have also been applied to meteorites from differentiated bodies such as Mars and the asteroid 4-Vesta [2].

Such *in situ* studies, which we will review, have proved vital to assess the volatile inventory of differentiated bodies, and have shown that they do contain indigenous volatiles, including hydrogen. Interestingly, H isotope data for these differentiated bodies are consistent with the bulk H isotope compositions of volatile-rich carbonaceous chondrites. While these studies have certainly measured indigenous hydrogen in samples from inner Solar System rocky bodies, they also highlight some challenges that need to be overcome to comprehensively characterise the origin and processing of volatiles in the inner Solar System.

References: [1] Saal *et al.* (2008) Nature 454, 192 [2] McCubbin & Barnes (2019) EPSL 526, 115771

Mots-Clés : NanoSIMS; Volatiles; Hydrogen Isotopes; Planetary Samples



Identification de nanostructures riches en Pb dans des monazites discordantes de Ultra Hautes Températures (UHT ; Madagascar, Antarctique)

Marion Turuani^{1*}, Anne-Magali Seydoux-Guillaume², Denis Fougerouse^{3,4},
David Saxey⁴, Steve Reddy^{3,4}, Antonin Laurent^{1,2}, Simon Harley⁵, Stéphanie
Reynaud⁶, William Rickard⁴

¹ LMV, Université de Lyon, UJM-Saint Etienne, France

² LGL-TPE, Université de Lyon, UCBL, ENSL, France

³ School of Earth and Planetary Sciences, Curtin University, Western Australia

⁴ John de Laeter Centre, Curtin University, Western Australia

⁵ School of Geosciences, University of Edinburgh, UK

⁶ Laboratoire Hubert Curien, UJM-Saint Etienne, France

La monazite est un des minéraux les plus utilisés en géochronologie avec le zircon. L'utilisation éclairée de ces géochronomètres repose sur des connaissances approfondies de leurs caractéristiques, telles que leurs comportements face aux variations physico-chimiques ou leurs relations pétrogénétiques.

Le couplage d'observations au Microscope Electronique en Transmission (MET) et d'analyses à la Sonde Atomique Tomographique (SAT) a permis d'ouvrir un champ de compréhension sur les mécanismes actifs à l'échelle nanométrique dans ces géochronomètres.

Les résultats présentés ici sont issus d'observations au MET et d'analyses à la SAT, sur des monazites discordantes provenant de granulites UHT archéennes et protérozoïques d'Antarctique et de Madagascar. Dans ces deux populations de monazite, des nanostructures riches en Pb ont été observées et engendrent manifestement des perturbations importantes dans les mesures d'âges qui s'étalent sur plusieurs centaines de millions d'années. Le couplage MET/SAT a permis d'identifier dans les monazites d'Antarctique, les différentes natures minéralogiques de ces nanostructures. De la galène (PbS) est identifiée ainsi que des inclusions polyphasées constituées d'une partie cristalline riche en Pb et d'une partie silicatée amorphe. Un troisième type de structure correspond à des nanodomaines (5-10 nm) très riches en Pb et inclus dans le réseau cristallin des monazites. Ces différentes structures se retrouvent dans les deux exemples étudiés (Madagascar et Antarctique), de contextes géologiques similaires ; il est donc intéressant de généraliser les mécanismes liés à leur formation.

Le couplage MET/SAT permet ainsi d'enrichir considérablement nos connaissances sur les processus minéralogiques dans les monazites. Comprendre ces processus peut être très avantageux dans l'utilisation des monazites en tant que géochronomètre en renforçant l'interprétation des âges et en aidant à reconstruire l'histoire géologique des roches.

Mots-Clés : monazite, SAT, MET, nanostructures, Antarctique, Madagascar, UHT



Caractérisation des matériaux massifs par imagerie

Eric Berthier ^{*1}, Anas El Mendili ¹, Christophe Fontugne ¹, Henry Pillière ¹

¹Thermo Fisher Scientific, Artenay, France

L'analyse quantitative des matériaux céramiques ou roches est généralement effectuée par le broyage d'une portion représentative d'un massif. La préparation d'un échantillon poudreux homogène est préconisée pour effectuer l'analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX). La même préparation peut aussi être utilisée pour l'analyse de fluorescence X (XRF). Pour chaque technique, la poudre est une portion échantillonnée du massif initial où est favorisé l'homogénéité chimique au dépend de la perte d'informations spatiales et morphologiques au sein du massif.

Nous proposons une méthode d'analyse d'une roche en étudiant une surface de coupe. Les données d'imagerie, les cartographies DRX et XRF sont fusionnées afin de mettre en évidence des corrélations chimiques et spatiales.

L'analyse combinée sur un échantillon massif de garniérine a été effectuée. Les régions d'intérêt ont été identifiées par les techniques d'analyses d'image et les quantités surfaciques ont été mesurées. A partir de l'intégrale des cartographies DRX/XRF, les phases minérales ont été identifiées. Les points de mesures DRX/XRF ont été sommés par régions d'intérêt identifiées par imagerie. Chaque diffractogramme sommé de chaque région a été raffiné par analyse Rietveld. Les cartographies des éléments chimiques choisis ont été superposées à l'imagerie.

Les mesures DRX ont été réalisées avec un diffractomètre Thermo Scientific ARL EQUINOX 100 configuré avec une source Cobalt. Les analyses XRF ont été faites avec un prototype expérimental en dispersion d'énergie configuré avec une source Molybdène. Une platine de cartographie XY a été conçue pour recevoir des échantillons massifs de formes variées. La comparaison entre cette méthode et l'analyse sur poudre a permis de mettre en évidence une technique rapide, innovante et précise, permettant de corréler la morphologie et la minéralogie.

Cette étude fait partie du projet SOLSA (689868), financé par le programme H2020 de la communauté européenne.

Mots-Clés : Cartographie, Diffraction, Fluorescence, Rayons X, Echantillon massif, EQUINOX 100, XRD, XRF



T10.5. Télédétection pour les géosciences



Mise en évidence des relations entre morphologie des côtes rocheuses et héritage géologique, à l'aide de méthodes de photogrammétrie par drone et d'imagerie hyperspectrale panoramique des falaises

Mathis Beaudit^{1,2}, Pierre Strzeczynski ^{1*}, José Cali², Patrick Launeau³,
Loïc Bouat¹, Manuel Giraud³, Ghyslaine Ferré², Giovanni Frati³

¹ LPG - CNRS-UMR6112 - Le Mans université - France

² L2G - CNAM - Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes - France

³ LPG - CNRS-UMR6112 - Université de Nantes - France

Situées à l'interface entre atmosphère, hydrosphère et lithosphère, les zones littorales constituent des interfaces particulières au sein de la zone critique. Sur les littoraux rocheux, l'absence d'accumulation de sédiments témoigne d'une dynamique dominée par les processus d'érosion. Ces côtes présentent généralement un plateau rocheux limité par une falaise. La plateforme rocheuse joue un rôle essentiel dans le maintien d'un trait de côte constant. Sa pente est corrélée à l'amplitude des marées. La forme de la falaise est quand à elle contrôlée par l'importance relative de l'érosion marine et météorique.

La morphologie du plateau et de la falaise, plane ou accidentée joue également un rôle important dans l'évolution de la côte rocheuse en dispersant ou au contraire en concentrant la houle sur la falaise. L'héritage géologique joue alors un rôle considérable en pré-structurant la plateforme rocheuse ou en favorisant localement le recul de la falaise.

L'objectif de cette étude est de mieux comprendre dans quelle mesure, l'héritage géologique conditionne la forme des falaises et des plateaux rocheux ainsi que leur résistance à l'érosion. Pour cela, nous avons choisi d'associer des méthodes d'imagerie et de restitution 3D : ce sont les techniques d'imagerie Lidar et hyperspectrale terrestre ainsi que la restitution topographique par photogrammétrie sur des images drone.

La cible est située en Pays de la Loire, au sud de la Vendée, à la limite entre le massif Armoricaire et le bassin Aquitain. L'héritage géologique court sur plus de 300Ma, depuis la fin de l'orogénèse Varisque. Il inclut des phénomènes tectoniques et pétrologiques ainsi que des épisodes d'émersion et d'interaction fluide-roches. Nous présentons des résultats préliminaires dans le contexte particulier de l'effondrement d'une arche rocheuse qui a eu lieu à l'hiver 2021.

Mots-Clés : littoral rocheux, héritage géologique, LIDAR, imagerie hyperspectrale, drone.



Subsidence associated with oil extraction, measured from time series analysis of Sentinel-1 data: case study of the Patos-Marinza oil field, Albania

Marianne Métois^{*1}, Mouna Benjelloun¹, Cécile Lasserre¹, Raphaël Grandin², Laurie Barrier², Edmond Dushi³, Rexhep Koçi³

¹Laboratoire de Géologie de Lyon, Université de Lyon, Université Lyon 1, ENS de Lyon, CNRS, UMR5276 LGL-TPE, 69622 Villeurbanne, France

²Institut de Physique du Globe de Paris, Université de Paris, UMR7154, CEDEX 05, 75238 Paris, France

³Institute of GeoSciences, Energy, Water and Environment, Polytechnic University of Tirana, Tirana, Albania

The Patos-Marinza oil field in central Albania (40.71°N, 19.61°E) is one of the largest onshore oil fields in Europe. More than 7 million oil barrels are extracted per year from the Messinian sandstone formations of the Durres Basin in the Peri-Adriatic Depression by the Bankers Petroleum Ltd. which has been operating the field since 2004.

In this study, we take advantage of the new Sentinel-1 radar images acquired every 6 to 12 d over Albania to measure the surface displacement in the Myzeqeja plain and in the Patos-Marinza oil field. Images from ascending and descending tracks covering the area are processed through a radar interferometry (InSAR) time series analysis over the 2014 to 2018 time span, providing consistent average line-of-sight velocity maps and displacement time series.

The regional deformation field exhibits a slow subsidence of the basin relative to the highlands (at rates of 2.5 mm yr⁻¹) that we interpret as a combination of natural and human-induced compaction. This broad picture is complicated by a strong local subsidence signal with rates as high as 15 mm yr⁻¹ that spatially correlates with the oil field and is maximal in the zone holding most of the operating wells, where enhanced oil recovery techniques are used. The spatial correlation between the maximum subsidence area and the active wells, as seen from optical images, argues in favor of surface deformation induced by oil extraction. This deformation is well reproduced by elastic models mimicking the compaction using planar negative tensile (closing) dislocations. Such modeling provides a first-order estimation of the volumetric deflation rate in the oil reservoir and suggests that concurrent injection activity has been conducted in the central part of the field where small uplift is observed. This new evidence of significant strain associated with the oil field operations raises the question of the potential impact of these operations on the local seismicity.

Mots-Clés : Subsidence, InSAR, Sentinel-1, oil and gas, induced seismicity and deformation, Albania



T10.6. Matière organique dans les milieux sédimentaires actuels et passés



Approche multi-analytique pour étudier les sources de matière organique dissoute dans un bassin versant périurbain.

Amine Boukra^{*1}, Matthieu Masson¹, Myriam Arhror¹, Corine Brosse¹, Loïc Richard¹, Soline Lebre¹, Mahaut Sourzac^{2,3}, Edith Parlanti^{2,3}, Cécile Miège¹

¹ UR RiverLy, INRAE – France

² EPOC, UMR 5805, Université Bordeaux – France

³ EPOC, UMR 5805, CNRS – France

Les sources de matière organique dissoute (MOD) dans un bassin versant sont très nombreuses : origines naturelle allochtone (issue du lessivage des sols) ou autochtone (produite dans le cours d'eau) et origines anthropiques ponctuelles (e.g. rejets de station de traitement d'eaux usées –STEU- ou rejets industriels) ou diffuses (e.g. fuites de réseau d'assainissement, exploitations agricoles). La diversification des sources dans un bassin versant périurbain impacte la composition de la MOD, et donc, sa réactivité et son devenir le long des cours d'eau. A ce jour, la caractérisation détaillée de la MOD issue de ces sources reste encore méconnue.

Cette étude vise à identifier des marqueurs physico-chimiques propres à des types de sources de MOD, en combinant différentes techniques d'analyses pertinentes pour leur description qualitative et quantitative. Ainsi, le dosage de carbone organique dissous, l'analyse par spectroscopie UV-Vis, la fluorescence 3D, la chromatographie d'exclusion stérique couplée à une détection optique et la spectrométrie de masse haute résolution couplée à la chromatographie en phase liquide ont été appliqués à une trentaine d'échantillons filtrés à 0.45 µm. Ces échantillons ont été prélevés dans des cours d'eau de tête de bassin à proximité immédiate de trois types d'occupations de sols (forestier, agricole et étangs), et dans des entrées et sorties de STEU. Les données générées ont été traitées par analyses multivariées.

Les résultats préliminaires permettent de discriminer différents groupes selon leurs propriétés optiques et leur composition globale/moléculaire. Ces groupes déterminés a posteriori permettent de retrouver, en partie, les types de sources échantillonnées a priori. Un traitement statistique plus complet, compilant toutes les données issues des différentes techniques, permet de mieux comprendre leur complémentarité, et à terme d'identifier des marqueurs fiables pour tracer les sources de MOD dans les bassins versants périurbains.

Mots-Clés : Matière organique dissoute, marqueurs physico-chimiques, bassin versant, COD, HPSEC(UV/Fluorescence), spectroscopie uv-vis et fluorescence, LC-HRMS.



Preservation and characterization of exopolymeric substances (EPS) in subsurface estuarine sediments

Thibault Duteil^{1,*}, Raphaël Bourillot¹, Olivier Braissant², Brian Gregoire³, Maud Leloup³, Adrien Henry¹, Benjamin Brigaud⁴, Eric Portier⁵, Hugues Fénies¹, Isabelle Svahn⁶ and Pieter Visscher⁷

¹*Georessources & Environnement, Bordeaux INP, Univ. of Bordeaux Montaigne, France*

²*Center for Biomechanics and Biocalorimetry, Univ. of Basel, Switzerland*

³*IC2MP, Univ. of Poitiers, France*

⁴*GEOPS, Univ. of Paris-Saclay, CNRS, France*

⁵*CV Associés Engineering, France*

⁶*Univ. Bordeaux, CNRS, INSERM, Bordeaux Imaging Center, France*

⁷*Department of Marine Sciences, University of Connecticut, United States*

In estuarine mudflats, diatoms often form intertidal biofilms through the excretion of large quantities of extracellular polymeric substances (EPS). These organic matrices allow for cell motility, protect against desiccation, provide a means for chemical communication and act as a barrier against pathogens. EPS interact with clay minerals and quartz grains producing an organo-mineral complex. Previous studies of EPS preservation focused on the uppermost millimeters to centimeters of the sediment. In our study, we characterized the preservation of EPS physico-chemical properties in a six-meter sedimentary core, obtained from an estuarine point bar in the Gironde estuary (France). Sixteen subsamples distributed along the depth of the core were used for grain size analyses, TOC measurements, cryo-scanning electron microscopic observations, and EPS extraction. The physico-chemical properties of EPS and alteration with depth were determined using/with various colorimetric assays (Alcian blue, phenol-sulfuric and Lowry), Fourier-transform infrared spectroscopy and acid-base titrations. The results show a preservation of the organo-mineral complex from the surface to the bottom of the core. EPS properties (quantity, acidity) were similar at the surface and at depth, and are statistically independent from sediment properties (grain size, TOC). The preservation of EPS several meters deep in the sediment could be explained by the interaction with minerals e.g., clay minerals, quartz, but also by the high sedimentary rates characteristic for the estuarine point bar (up to several cm. year⁻¹), minimizing microbial alteration. Furthermore, the variations of EPS properties with depth could be linked with phases of point bar migration and stabilization. Our results provide novel insights into the role of sedimentation on EPS preservation and ultimately, sediment (mineral) composition.

Mots-Clés : Estuarine sediments, exopolymeric substances, clay-coat



Volcanic inputs strongly influence organic matter content and properties in tropical soils

Stephanie Grand ^{*1}, Raphaël Bocherens ¹

¹ Faculty of Geosciences and Environment – University of Lausanne - Switzerland

Many tropical soils in stable landscapes have undergone extensive weathering. As a result, their mineralogy is dominated by resistant primary minerals (chiefly quartz) and secondary phases such as kaolinitic clays and crystalline iron and aluminum oxides. These minerals are thought to have a relatively low capacity to sorb organic matter (OM) to form organo-mineral complexes, therefore limiting OM accumulation. In strongly weathered soils, OM content is thus typically low and highly susceptible to oxidative losses following soil disturbance.

In this study, we sampled soils at four locations in the Albertine rift region of western Uganda. Contrary to expectations, we found that soils had high organic carbon content (up to 13.8%) and that agricultural soils were not prone to OM losses, compared to undisturbed soils under forest cover. We hypothesized that inputs of volcanic materials “refreshed” soil mineralogy, which could have promoted the accumulation of OM in soils of this tectonically active region.

Although three of the four sampling locations were situated within the volcanic field of Ndale, no trace of volcanic ejecta could be found in the field. Geochemical and mineralogical analyses showed that bulk soil composition was typical of weathered to strongly weathered tropical soils. Petrographic analysis of soil thin sections, however, revealed the presence of small amounts of weatherable mafic to felsic primary minerals. Their origin was most probably recent volcanic ejecta and pulverized basement rock.

The presence of weatherable minerals was positively associated with OM accumulation as well as with the occurrence of high activity (smectitic) clays and poorly crystalline Fe oxides. Density fractionation and selective extraction showed that most of the OM was present as organo-mineral complexes. This suggests that the small proportion of reactive mineralogy present in the soils was sufficient to promote OM sorption to mineral surfaces, even ones considered as non-reactive (such as quartz), by forming coatings.

Altogether, these results show that small amounts of weatherable mineral inputs can significantly alter soil biogeochemical processes, including OM accumulation and chemical fertility. This raises interesting research perspectives as enhanced weathering, which refers to the spreading of powdered mafic rocks on agricultural lands, comes under consideration as a C sequestration technology.

Mots-Clés : Soil organic carbon, African Rift, Ferralsol, Plinthosol, micromorphology, olivine, pyroxene, ferrihydrite, organo-mineral interactions, pyrophosphate, oxalate and dithionite extraction, Rock-Eval pyrolysis



Signification moléculaire du signal S2 de la pyrolyse Rock-Eval

Jérémy Jacob^{1,*}, Frédéric Delarue², Yoann Copard³, Claude Le Milbeau⁴,
Patrick Brockmann¹

¹ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, UMR 8212 CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay - France

² Milieux environnementaux, transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols, UMR 7619 CNRS-EPHE-PSL Research University-Sorbonne University - France

³ Laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière, UMR 6143 CNRS-Université de Rouen-Normandie - France

⁴ Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, UMR7327 CNRS-BRGM-Université d'Orléans - France

La pyrolyse Rock-Eval (RE) est l'une des méthodes permettant d'estimer la qualité et la quantité de matières organiques (MOs) stockées ou transitant entre les différents réservoirs de C (lithosphère, pédosphère, hydrosphère). Seuls quelques paramètres (COT, IH, IO, Tmax) sont utilisés de manière régulière. De nombreux auteurs conviennent que la pyrolyse RE pourrait fournir des informations plus élaborées sur les MOs, à travers les nombreux autres indices délivrés, ou l'étude plus détaillée des signaux de pyrolyse. Parmi ces auteurs, Disnar et al. (2003) et Sebag et al. (2006) ont proposé que la déconvolution mathématique en gaussiennes simples du pic S2 permettait de distinguer les constituants organiques labiles et récalcitrants. Cependant, la nature chimique de ces gaussiennes est mal contrainte. Nous proposons une nouvelle méthode qui permet d'étudier en continu la nature chimique des matières libérées lors de la phase de pyrolyse. Nous avons couplé un pyrolyseur programmable (Pyroprobe 5150) à un spectromètre de masse (ISQ700). L'analyse de standards de sols, roches, tourbe, charbon et MO dissoutes fournit les informations suivantes : (1) les résultats sont reproductibles et quantitatifs; (2) la réponse du spectromètre de masse dépend de la quantité d'échantillon et de sa nature; (3) des températures distinctes sont relevées au pic des courbes de production des m/z; (4) elles sont consistantes entre répliques et au sein d'une même famille d'échantillons; (5) les températures s'organisent en au moins 4 clusters de m/z de natures chimiques distinctes; (6) des sous-clusters sont identifiés; (7) des effets liés à la matrice minérale et au degré d'organisation des MOs pourraient expliquer les différences mineures observées entre échantillons. Rapide, simple de mise en œuvre et économe en échantillon, cette nouvelle méthode pourrait permettre, à terme, de combler le fossé persistant entre analyses globales et moléculaires.

Mots-Clés : Rock-Eval, pyrolyse, déconvolution, matières organiques, carbone organique particulaire, S2



Stratégie pour la construction d'une base de données d'empreintes moléculaires organiques dissoutes par chromatographie liquide couplée à un spectromètre de masse haute résolution (LC-HRMS)

Soline Lèbre¹, Matthieu Masson^{*1}, Sylvain Merel¹, Amine Boukra¹, Cécile Miège¹

¹ UR RiverLy, INRAE - France

Les milieux aquatiques sont soumis à de nombreuses sources de pollution anthropique (eaux de ruissellement en zone rurale ou urbaine, rejets industriels, rejets de station de traitement d'eaux usées, déversoirs d'orage...) dont chacune contient de la matière organique dissoute (MOD) spécifique. L'analyse de la MOD peut donc renseigner sur l'origine d'une pollution dans un milieu aquatique.

L'analyse non ciblée par chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse haute résolution (LC-HRMS) permet d'acquérir une vision approfondie de la composition moléculaire organique d'un échantillon (i.e. des milliers de molécules caractérisées par leur masse, temps de rétention et abondance) qui peut être interprétée comme une empreinte chimique. L'étude de ces empreintes nécessite la construction d'une base de données à partir d'échantillons reflétant des sources diverses et leur variation temporelle. La comparaison des données issues de séries analytiques différentes est impossible à cause des dérives instrumentales et de l'absence de contrôle qualité adéquat, i.e. un étalon stable contenant les milliers de signaux m/z représentatifs des échantillons. Notre objectif est de développer un "workflow" incluant une stratégie d'assurance qualité pour permettre l'étude comparée de différentes sources de MOD, issues de différentes séries d'analyses par LC-HRMS.

Outre la stratégie de tri et de correction des données par des algorithmes mathématiques, nous présentons ici les résultats d'un test sur la pertinence d'un contrôle qualité (CQ) fabriqué à partir d'extractions liquides de la MOD issue de sols, en faisant varier le type de sol et d'extraction (solvant aqueux, temps de contact sol/eau ; la fraction sol/eau). Une fois l'extraction optimale sélectionnée à l'aide d'un plan d'expériences carré gréco-latin, celle-ci a été répétée 10 fois pour comparer la variabilité de la composition du CQ avec celles d'échantillons d'eaux de rivières.

Mots-Clés : Matière organique dissoute, empreintes chimique, spectrométrie de masse haute résolution, contrôle qualité, base de données HRMS.



Caractéristiques optiques de la matière organique dissoute dans des eaux usées domestiques

Matthieu Masson ^{*1}, Edith Parlanti ^{2,3}, Amine Boukra ¹, Corinne Brosse-Quilgars ¹,
Mahaut Sourzac ^{2,3}, Myriam Arhror ¹, Loïc Richard ¹, Cécile Miège ¹

¹ UR RiverLy, INRAE – France

² EPOC, UMR 5805, Université Bordeaux – France

³ EPOC, UMR 5805, CNRS – France

La matière organique, constituant majeur des milieux aquatiques, joue un rôle clé au cœur des processus biogéochimiques. Du fait de son abondance et de sa forte mobilité, la matière organique dissoute (MOD ; $<0,45 \mu\text{m}$) contribue fortement au cycle global du carbone depuis les têtes de bassins versants jusqu'aux écosystèmes océaniques et marins. En plus des sources naturelles, il existe de nombreuses sources de MOD d'origine anthropique comme les rejets de station de traitement d'eaux usées (STEU), les déversoirs d'orages, les fuites de réseaux d'assainissement. La MOD d'origine anthropique possède généralement des propriétés physico-chimiques et une réactivité différentes de la MOD naturelle. Cependant, la composition et les propriétés de la MOD anthropique restent encore sous-documentées.

L'objectif de cette étude est de mieux caractériser la MOD d'origine anthropique en combinant les informations obtenues à partir de deux types de caractérisation optique : spectrophotométrie UV-vis couplée ou non à la chromatographie d'exclusion stérique (HPSEC) et fluorescence 3D. Ces techniques ont été appliquées à plus de 80 échantillons d'eaux résiduaires, principalement des entrées et sorties de STEU de capacités et procédés de traitements variables représentant autant de types de sources potentielles de MOD vers le milieu aquatique. La combinaison des résultats permet d'identifier clairement des qualités de MOD dépendant des types d'eaux prélevées (par ex. entrées de STEU de grosses vs. petites collectivités) malgré une variabilité temporelle importante pour certaines sources. De nouveaux descripteurs pour caractériser la MOD (e.g. ratio des absorbances à 227 et 254 nm par HPSEC-UV) ont été testés. Les résultats ont permis de mettre évidence des indicateurs pertinents (e.g. contributions des principaux fluorophores obtenus par analyse PARAFAC) pour construire des empreintes spectrales typiques et proposer une typologie de la MOD issue de sources anthropiques diverses.

Mots-Clés : matière organique dissoute, source anthropique, rejet, spectrophotométrie UV-vis, spectres de fluorescence 3D, empreintes spectrales



Observation en temps réel de la spéciation du soufre et de son partage entre les phases aqueuse et hydrocarbonée pendant des expériences de réduction thermochimique des sulfates.

Raymond Michels^{1*}, Guillaume Barré¹, Laurent Truche², Valérie Burklé- Vitzthum ³,
RodaBounaceur³, Catherine Lorgeoux¹

¹ Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources, UMR 7359 - France

² Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, ISTerre – France

³ Université de Lorraine, LRGP CNRS-UMR 7274, ENSIC - France

Mots-Clés : expérimentation, TSR, réactivité du soufre, hydrocarbures, réservoir pétrolier.

En géochimie organique, la majorité des expériences hydrothermales sont conduites dans des réacteurs fermés. Dans certains cas des réactifs peuvent être injectés ou des produits retirés en cours de réaction. Et dans la plupart des cas, les produits de réactions sont analysés en dehors des conditions expérimentales, typiquement après l'arrêt du réacteur. Les bilans de masse sont ainsi calculés sur la base de séries d'expériences à degré d'avancement croissant et les produits caractérisés à chaque étape. Les chemins réactionnels sont ensuite proposés de façon à concilier bilan de masse et nature des produits.

Cependant, des espèces réactives transitoires apparaissant pendant l'expérience, disparaissent une fois que température et pression sont revenues aux conditions ambiantes. Leur nature, abondance et distribution entre phases peuvent changer avec les conditions expérimentales. Les négliger peut avoir des conséquences sur notre compréhension des mécanismes réactionnels et ainsi altérer la qualité des modélisations. Aussi, les expériences tiennent rarement compte des changements de phase et de la répartition des espèces chimiques que cela implique.

Un aspect clé est donc de mener les expériences dans des réacteurs qui permettent le suivi in-situ des espèces chimiques dans chaque phase en présence. Dans le cas de la réduction thermochimique des sulfates (TSR) trois phases doivent être suivies: les phases liquides aqueuse, et hydrocarbonée ainsi que la phase gazeuse.

Nous présenterons ainsi le suivi in-situ du devenir du soufre dans les trois phases, grâce à l'utilisation de micro-capillaires de silice couplés à des analyses par micro-spectroscopie Raman. Cette technique permet d'analyser chaque phase indépendamment dans une même expérience. La détermination de la nature et de la répartition des espèces chimiques en cours de réaction a ainsi des implications sur notre façon de concevoir et modéliser la réactivité des interactions entre espèces soufrées et hydrocarbonées.



Les alcanes dissous, traceurs de transfert des solutes entre réservoirs souterrains.

Raymond Michels^{1,*}, Irina Panfilova², Agnès Vinsot³, Stefan Wechner⁴

¹ Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources, UMR 7359, CREGU - France

² LEMTA, CNRS-Université de Lorraine, UMR7563 -

France³ Andra, Centre de Meuse/Haute-Marne -

France ⁴Hydroisotop GmbH, Schweitenkirchen - Allemagne

Dans le cadre de ses études géologiques et hydrogéologiques, l'Andra a foré le puits EST433 de 2000m de profondeur à Montiers-sur-Saulx. Pour chaque échantillon de roche prélevé, la concentration relative à la masse d'eau de l'échantillon ainsi que la composition isotopique en carbone et hydrogène ont été déterminées pour les constituants individuels de la classe C₁- C₄. L'étude de la nature, de l'origine et de la distribution de ces alcanes en concentrations traces a été entreprise afin d'apporter de nouvelles contraintes sur les possibilités de migration des solutés dans la pile sédimentaire.

Dans les diagrammes géochimiques les alcanes C₁-C₄ présentent des caractéristiques compatibles avec une origine thermogénique. Bien que le profil global d'évolution des alcanes avec la profondeur présente une augmentation dans la proportion relative en méthane, un examen détaillé des distributions révèle des variations plus complexes en relation avec l'organisation des lithologies. Ainsi, les données géochimiques ont-elles été interprétées en association avec ces dernières le long du profil géologique.

Afin de mieux appréhender les variations des concentrations relatives en méthane, une modélisation de la diffusion 1D utilisant le logiciel Comsol a été réalisée. Parmi les 28 variables considérées, le modèle prend en compte les lithologies, perméabilités, le gradient géothermique actuel, le coefficient de diffusion effectif du méthane en solution. Le potentiel en hydrocarbures des roches-mères, les faciès argileux et les communications avec les aquifères sont parmi les paramètres majeurs gouvernant les origines et la diffusion des alcanes. Les grandes tendances du profil de distribution du méthane sont reproduites par le modèle qui apporte ainsi des contraintes physiques aux interprétations géologiques et géochimiques.

Cette étude montre que les alcanes en solution sont des traceurs originaux dans la compréhension des transferts de fluides et de solutés dans les systèmes géologiques même dans des sections de bassins dans lesquelles les roches-mères sont thermiquement immatures.

Mots-Clés : Bassin sédimentaire, réservoirs, transferts, alcanes, gaz, transferts.



Identifying controls on organic matter enrichments in hemipelagic settings: a biomarker approach

Armelle Riboulleau ^{*1}, Melesio Quijada ¹, Alexis Caillaud ¹, Jean-Yves Reynaud ¹,
Jean-Noël Ferry ², François Baudin ³, Nicolas Tribouvillard ¹

¹ Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – UMR8187, CNRS, Université de Littoral Côte d'Opale, Université de Lille – France

² TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – France

³ Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP) - UMR 7193, Sorbonne Université, CNRS - France

The Marnes Bleues Formation (Aptian-Albian) from the Vocontian Basin (Southeastern France) shows many dark colored levels, some of which are concomitant to oceanic anoxic events OAE1a and OAE1b. These levels are scattered among a thick succession of organic matter (OM)-poor marls. The aim of this study is to compare the dark levels in order to determine whether their deposition was related to similar or variable mechanisms of formation.

The Goguel Level, Niveau Noir Interval, Fallot Interval, Jacob, Kilian and Paquier Levels were sampled, as well as encasing marls. Samples were analyzed by Rock-Eval pyrolysis and their biomarker content was analyzed using standard procedure.

The studied samples are characterized by low contents of organic carbon, with TOC values often lower than 2%. Maximum TOC values (up to 7.2%) were observed in the Goguel Level. The average TOC value of the marls is 0.74%. Hydrogen index (HI) and oxygen index values indicate type II to type III OM, with the highest HI values observed in the Goguel Level. Tmax values are generally below 435°C and indicate immature OM. The biomarker contents of the different dark levels and marls are overall comparable. Their distribution indicate OM of marine origin deposited under moderately oxygenated conditions. The Paquier Level, however, differs by its abundance of archaea-derived compounds. Terrestrial plant biomarkers are present in low proportion in all the samples. The marls, as well as several dark levels, show a significant proportion of highly condensed polyaromatic compounds.

The Paquier Level excepted, the apparent homogeneity of results confirms that depositional conditions remained relatively stable in the hemi pelagic setting of the Vocontian Basin during the studied interval. Nevertheless, differences in the relative proportions of minor compounds e.g. terrestrial plant biomarkers or polyaromatic compounds allow identify subtle differences in the depositional conditions.

Mots-Clés : Biomarker, Vocontian Basin, OAE, Marnes Bleues Formation



Changements paléoenvironnementaux et paléoclimatiques au nord du Cameroun à l'Holocène : la tourbière de N'Gaoundaba

V.Schaaff ^a, M.Makou^a, V.Grossi^a, S.Ansanay-Alex ^a, I.Antheaume ^a, P.Deschamps^b, B.Hamelin ^b, Y.Garcin^b, D.Sebag^c, B.Ngounou Ngatcha^d, G.Ménot^a

^a LGLTPE, Univ Lyon, ENS de Lyon, Université Lyon 1, CNRS, Lyon, France

^b CEREGE, Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRA, Coll France, Aix-en-Provence, France

^c IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison, France

^d LAMISE, University of NGaoundéré, NGaoundéré, Cameroon

Les tourbières présentent une archive intéressante pour les reconstructions paléoclimatiques et paléoenvironnementales. Ces sédiments riches en matière organique peuvent préserver de grandes quantités et une forte diversité de composés organiques tels que des pollens, des macrofossiles de plantes ou des biomarqueurs. Dans cette étude, nous avons analysé une carotte de 6 mètres de long provenant de la tourbière de NGaoundaba (Nord-Est du Cameroun) couvrant les derniers 10 000 ans en utilisant un large panel de biomarqueurs lipidiques [Glycérol-dialkyl-glycerol-tetraethers isoprenoïdes et branchus (isoGDGT et brGDGT respectivement), *n*-alkanes, hopanoides et des produits de dégradations de plantes]. Cette étude fournit un enregistrement paléoclimatique et paléoenvironnemental supplémentaire pour l'Afrique tropicale couvrant notamment la fin de la Période Humide Africaine (African Humid Period, AHP).

Un assemblage varié de biomarqueurs lipidiques a été détecté dont des *n*-alcane du C₁₉ au C₃₇, des hopanes et hopènes du C₂₇ au C₃₁, des GDGTs (iso- et brGDGTs). Les profils de distributions et de concentrations en fonction de la profondeur montrent d'importantes différences suivant les biomarqueurs. Les index basés sur les *n*-alkanes présentent des variations intéressantes pouvant être reliées à des changements dans la végétation ou l'hydrologie de la tourbière. Par exemple, les valeurs de P_{aq} (ratio des apports aquatiques sur les apports terrestres) [1] indiquent une contribution importante des plantes submergées ou flottantes aux alentours de 8ka cal BP ce qui est cohérent avec les conditions plus humides observées lors de la Période Humide Africaine. Les calibrations de température et de pH basées sur les brGDGTs spécifiques des tourbes [2] ou des sols [3] ont été appliqués aux données de la tourbière de NGaoundaba. Le résultat est cohérent avec les variations d'insolation et avec les données de pollen du Lac MBalang [4] situé à 20km au nord de NGaoundaba. Les données δD_{n-alk} basées sur le C₃₁ ou le C₃₃ sont minimales autour de 7ka cal BP et sont une fois de plus cohérentes avec la Période Humide Africaine mais présentent un décalage par rapport au P_{aq} par exemple pouvant résulter de dynamiques différentes entre les végétaux vivants dans la tourbière et ceux vivant à proximité de la tourbière. Les données δ¹³C_{n-alk} et δ¹³C des hopanes vont venir compléter ce travail et permettre de préciser les interprétations en termes de variations de végétation et de méthanotrophie.

[1] Ficken et al. (2000) Organic Geochemistry 31, 745–749.

[2] Naafs et al. (2017) Geochimica et Cosmochimica Acta 208, 285 - 301.

[3] Dearing Crampton-Flood et al. (2020) Geochimica et Cosmochimica Acta 268, 142-159

[4] Vincens et al. (2010) Clim. Past 6, 281- 294.

Mots-Clés : biomarqueurs ; climat ; Afrique ; Holocène



Les hydrocarbures comme marqueurs des transferts entre les compartiments géologiques profonds et la zone critique. Le cas du secteur de Pechelbronn.

Laurie Tchang-Tchong^{*1}, Raymond Michels¹, Pierre Faure², Catherine Lorgeoux¹

¹ Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources, UMR 7359 - France

² Université de Lorraine, CNRS, LIEC, UMR 7360 - France

Ce travail est financé par le projet DEEPSURF "Lorraine Université d'Excellence", ANR-15-IDEX-04-LUE.

Le Fossé Rhénan est un rift intracontinental d'âge Cénozoïque, qui s'étend en partie en France, en Allemagne et en Suisse, sur 300 km de long et 30-40 km de large. Sa géométrie actuelle correspond à un ensemble de demi-grabens asymétriques et antithétiques, reliés entre eux par des zones de transfert utilisant des structures héritées du Paléozoïque. Le champ pétrolier de Pechelbronn, situé au nord de l'Alsace, est connu pour son caractère hydrothermal lié à l'anomalie thermique positive de Soultz-sous-Forêts. Les études des circulations fluides du champ géothermique de Soultz-sous-Fôrets sont abordées dans la littérature par le biais des interactions fluides-roches. Cependant, peu de travaux se sont intéressés aux interactions entre ces circulations et le système pétrolier lors de l'évolution du rift.

La présence d'hydrocarbures dans le sous-sol permet d'appliquer un raisonnement alternatif et complémentaire, basé sur les propriétés des systèmes pétroliers. L'objectif de nos travaux est d'utiliser les hydrocarbures comme marqueurs des transferts de fluides depuis les roches-mères jusqu'aux réservoirs puis des réservoirs vers la surface. Ainsi, la première étape de cette étude est de connaître l'extension du/des système(s) pétrolier(s) du secteur. Dans la littérature, il existe une controverse à ce sujet. Certains auteurs ont publié des valeurs du pouvoir réflecteur de la vitrinite mesurées dans les séries jurassiques de Pechelbronn qui témoignent d'une maturité thermique suffisante pour la génération d'huile et de gaz. Cependant, d'autres auteurs soutiennent que les roches-mères des champs pétroliers du secteur sont sous-matures. Ceux-ci suggèrent alors que les transferts d'hydrocarbures se font sur des grandes distances, depuis les zones les plus enfouies au centre du bassin. Il demeure donc incertain si les transferts s'opèrent sur des courtes ou grandes distances. Cette question est ici abordée par l'utilisation de techniques d'analyses de géochimie organique. Les résultats d'analyse des huiles de Pechelbronn et des roches-mères présentes à l'affleurement offrent des clés de réponse à la question qui prédomine dans l'analyse du système pétrolier : « Existe-t-il une cuisine pétrolière dans le secteur de Pechelbronn ? ».

Mots-Clés : Bassin sédimentaire, hydrocarbures, transferts, géochimie organique, géothermie, système pétrolier



La nécrophagie comme moyen de survie microbienne dans les fonds de la Mer Morte

Camille Thomas^{1*} - Vincent Grossi² – Ingrid Antheaume² – Daniel Ariztegui¹

¹ Département des Sciences de la Terre, Université de Genève, Suisse

² Laboratoire de Géologie de Lyon, Université Lyon 1, France

La Mer Morte, le lac le plus salé sur Terre, voit depuis plusieurs dizaines d'années son niveau baisser d'environ un mètre par an. Sa salinité ne fait donc qu'augmenter au fil du temps, n'autorisant que quelques organismes microbiens, dont les archées halophiles, à s'y développer. Ces archées sont particulièrement adaptées aux spécificités de la vie en milieu hypersalin, que ce soit dans la colonne d'eau oxique, ou dans les sédiments anoxiques. Un forage continental réalisé par un consortium scientifique international dans le cadre du programme ICDP a permis d'identifier les variations de la diversité de la biomasse aquatique et sédimentaire, notamment par le séquençage du gène 16S rRNA issu d'inclusions fluides et de niveaux gypseux et halitiques déposés lors des derniers 150000 ans. Ces résultats montrent que lors des périodes les plus arides, les archées halophiles du type *Halobacteria* ont systématiquement dominé l'écosystème de la Mer Morte, tandis que les eucaryotes et les bactéries semblaient absents.

Ces résultats sont remis en question suite à la découverte de lipides particuliers (des cires d'esters) dans les niveaux de sel et de gypse précipités lors des périodes de plus bas niveau du lac. Ces composés, généralement synthétisés par des bactéries ou des eucaryotes, sont ici principalement constitués de fragments isoprènes issus de la dégradation des lipides constitutifs des membranes d'archées halophiles (archaeol et extended-archaeol). D'autres présentent également des fragments d'origine eucaryote ou bactérienne. Les signatures isotopiques de ces fragments, ainsi que la présence de nombreux intermédiaires de dégradation des lipides d'archées suggèrent un recyclage de la biomasse d'archées par des bactéries. La production de ces cires d'ester permettrait le stockage de réserves d'énergie ainsi que la production de molécules d'eau dans l'environnement extrême que forment les sédiments profonds hypersalins de la Mer Morte. Cela constituerait ainsi une stratégie unique de survie pour ces bactéries censées être moins bien adaptés que les archées aux conditions de vie en Mer Morte, étendant ainsi nos connaissances sur le recyclage de la matière organique sédimentaire et les limites de la vie au sein de la biosphère profonde.

Mots-Clés : lipides, hypersalin, archées, bactéries, biosphère profonde, sédiments lacustres



T11.1. IWTOAE IGCP-655 Evènement anoxique du Toarcien (Workshop)



Volcanically induced warming and sea-level rise as triggers of exceptional vertebrate preservation in Toarcian shales of southern France (Hérault)

Brahimsamba Bomou ^{*1}, Anne-Sabine Grosjean ², Baptiste Suchéras-Marx ³, Ján Schlögl ⁴, Thierry Adatte ¹, Jorge Spangenberg ¹, Jean-Michel Brazier ⁵, Vincent Fernandez ⁶, Stéphane Fouché ⁷, Corentin Gibert ⁸, Kevin Janneau ⁹, Vincent Perrier ¹⁰, Peggy Vincent ¹¹, Axelle Zacaï ⁸, Jeremy E. Martin ¹⁰, Guillaume Suan ¹⁰

¹ Institute of Earth Sciences (ISTE), University of Lausanne, Switzerland.

² Paleorhodania, 69006 Lyon - France.

³ Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, Coll France, CEREGE, Aix-en-Provence, France.

⁴ Department of Geology and Paleontology, Comenius University, Bratislava, Slovakia.

⁵ Institute of Applied Geosciences, Graz University of Technology, Austria.

⁶ Imaging and Analysis Centre, Natural History Museum, Cromwell Road, London, UK.

⁷ Musée de Lodève, 34700, Lodève, France.

⁸ Laboratoire PALEVOPRIM: UMR 7262, CNRS-INEE, Université de Poitiers, France.

⁹ Université de Strasbourg (UNISTRA), Jardin des sciences, Strasbourg, France.

¹⁰ Université de Lyon, UCBL, ENSL, CNRS, UMR 5276 LGL-TPE, Villeurbanne, France.

¹¹ Sorbonne Université –Département Origines et Evolution, UMR CNRS-MNHN-UPMC 7207,(CR2P), France.

Over the past three years, paleontological excavations realized in lower Toarcian (Lower Jurassic) strata around Lodève, Hérault (France) have yielded several specimens of marine vertebrates. The newly discovered specimens are partly or entirely preserved in anatomical connection and include a partial ichthyosaur skeleton with soft tissues as well as a complete, >4 m-long longirostrine marine crocodile. We have developed a multi-proxy approach (XRD-bulk and clay mineralogy, Rock-Eval pyrolysis, phosphorus and mercury contents) to replace these findings in a well-defined temporal and paleoenvironmental context, and hence constrain the factors that led to their remarkable preservation. The fossiliferous succession exposes a 3 m-thick upper Pliensbachian interval of marl and nodular carbonate beds, overlain by a 3 m-thick interval of lower Toarcian laminated shales and limestone beds. Our high-resolution ammonite biostratigraphy, combined with inorganic and organic carbon isotope chemostratigraphy, shows that the fossiliferous Toarcian strata were deposited at a time of global warming and major carbon cycle perturbation known as the Toarcian Oceanic Anoxic Event (T-OAE). The studied succession shows several similarities with the classical coeval fossiliferous Posidonia Shale in SW Germany, including high organic matter and hydrocarbon contents as well as extremely reduced sedimentation rates. These results indicate that the unusual richness in exceptionally preserved vertebrates of the studied site can be explained by a combination of warming-induced, prolonged seafloor anoxia and reduced dilution by low carbonate and terrigenous input due to rapid sea-level rise. Our preliminary results also reveal a significant peak in mercury at the base of the T-OAE interval, consistent with that recorded in several coeval sections (e.g. Portugal, Morocco, Argentina, Chile). This mercury anomaly, most likely resulting from intense volcanic activity of the/in the Karoo-Ferrar large igneous province, suggests that widespread exceptional vertebrate preservation during the T-OAE was induced by a suite of severe environmental perturbation ultimately triggered by intense volcanic emissions.

Mots-Clés : Pliensbachian, Toarcian, T-OAE, crocodile, biostratigraphy, paleoenvironment, volcanism



Assessing the effect of hiatal surfaces on our understanding of the Pliensbachian–Toarcian boundary event

Stéphane Bodin^{*1}, Francois-Nicolas Krencker ¹, Alicia Fantasia¹

¹ Department of Geoscience, Aarhus University, Denmark

The Pliensbachian–Toarcian boundary (Pl/To) event is the first manifestation of the protracted early Toarcian environmental perturbations that reached a climax during the T-OAE. Compared to this latter event, the Pl/To boundary is however less well-understood. Hence, contradictory evidences have been presented about, for example, change in carbon cycle or sea-level fluctuations during this event. Uncertain is also the relationship of the Pl/To event with the preceding late Pliensbachian Spinitum cold snap. In this study, we will present the results of integrated chemo-sequence stratigraphy studies from SE France and Morocco that will highlight how the presence of ubiquitous hiatal surfaces in the stratigraphic record has so far blurred our understanding of this event. These hiatal surfaces are linked to the rhythmic sea-level fluctuations spanning the late Pliensbachian – early Toarcian transition as well as to the dramatic change in sediment supply associated with the Pl/To event. In general, our study highlights the valuable contribution of basin proximal–distal transects in order to extract paleo-environmental information during time of climatic upheavals.



Palaeoecology, palaeogeographic and stratigraphic distributions of *Saurostomus esocinus* AGASSIZ: a large pelagic pachycormid fish (Pachycormiformes) from the Toarcian of Europe

Samuel L. A. Cooper ¹* and Erin E. Maxwell ¹

¹Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart, Rosenstein 1, 70191 Stuttgart, Germany

Pachycormiformes represent a diverse monophyletic group of neopterygian fishes with a stratigraphic range from the Early Jurassic (Toarcian) to Late Cretaceous. Early radiation of the group in the Toarcian gave rise to a trophically disparate clade which include teuthophagous, piscivorous and gigantic filter feeding forms. *Saurostomus esocinus* is a large pelagic pachycormid, with a standard length reaching up to 1.8 m from the Early Toarcian black shale deposits of Germany, Luxembourg, France, and two horizons in the United Kingdom including the Strawberry Bank Lagerstätte. Despite historic records originating as far back as 1843, the anatomy, palaeoecology and stratigraphic range of *Saurostomus esocinus* has remained poorly documented. Anatomical re-description of the skeleton has revealed functional specializations for pelagic fast-swimming, notably the shape and placement of the fins, a streamlined body, reduced squamation and presence of a 'pre-caudal scaly keel' on the caudal peduncle, interpreted as functionally convergent to the lateral keel scales in extant tunas. Examination of exceptionally preserved stomach contents has revealed a diet entirely composed of loligosepiid and diplobeliid coleoids, leading us to reject previous assumptions of a piscivorous diet in *Saurostomus*. *Saurostomus* ranges from the upper *semicelatum* Subzone to the lower *elegans* Subzone (beds ϵII_1 – ϵII_6) of the Posidonienschiefer Formation. Body size and relative abundance were plotted against stratigraphy, with the highest values of both peaking immediately after the onset of the T-OAE in the lower *exaratum* Subzone (bed ϵII_4). Environmental changes resulting from the T-OAE appear to have resulted in increased body size and abundance of *Saurostomus*, although whether this was driven by biotic changes (e.g., increased prey availability) or abiotic changes (e.g., oceanic warming) is unclear.





The organic matter of Lower Toarcian Schistes Carton (Paris Basin): phytoplanktonic vs bacterial source

Carolina Fonseca ^{*1}, João Graciano Mendonça Filho ², Carine Lézin ¹, François Baudin ³, António Donizeti de Oliveira ², Jaqueline Torres Souza ², Luís V. Duarte ⁴

¹ Géosciences Environnement Toulouse, Université de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS - France

² Laboratório de Palinofácies e Fácies Orgânica (LAFO), Universidade Federal do Rio de Janeiro - Brazil

³ Sorbonne Université, CNRS, IStEP UMR 7193 – France

⁴ University of Coimbra, MARE - Marine and Environmental Sciences Centre – Portugal

The Paris Basin is regarded as one of the most studied basins worldwide with special focus being given to its Lower Toarcian record, the organic-rich Schistes Carton. The study of the organic fraction of these sediments has been mainly based on its molecular fraction, without support of petrographic observations. Here, a multi-proxy approach using petrographic and geochemical techniques was applied to the study of the organic content of the Schistes Carton, whose phytoplanktonic origin has been previously inferred based only on its geochemical signature.

The organic fraction of all samples (Serpentinum Zone, Elegantulum Subzone of EST433 borehole) is dominated by bacterial amorphous organic matter (AOM): (i) products from bacteria (EPS); (ii) with a plate-like feature; and, (iii) microbial mats. EPS, produced by cyanobacteria and minor thiobacteria (autotrophic-photosynthetic bacteria), is rich in lipids, carbohydrates and proteins, and extremely resistant. EPS may suffer microbiological reworking and exhibit a dense, highly-fluorescent, plate form aspect. Microbial mats are derived from primary productivity of bacteria. This suggests deposition in a proximal environment under stagnant and restrictive conditions, with stratified water column (episodic euxinia). Some geochemical studies previously stated that the contribution of bacterial material should not be disregarded based on the occurrence of extended hopanoids, acyclic isoprenoid lycopane, and isorenieratane. Similar petrographic and geochemical features have been described by several authors in different basins, namely in Australian Cambrian oil shales deposited in similar paleoenvironmental conditions.

The kerogen Type II signature of the Schistes Carton, assuming it had a marine phytoplanktonic origin, was the base for the definition of the pathway of this type of kerogen. This could consequently indicate that kerogen Type II may also characterize an organic association rich in bacterially-derived AOM. Therefore, it is important to acknowledge that kerogen origin is much more varied than one might infer from classic interpretations of kerogen types.

Thus, this study suggests a bacterial origin to the Schistes Carton dominant AOM, demonstrating the importance of an integrated approach to the determination of the organic facies.

Mots-Clés : Schistes Carton, Organic facies, Palynofacies, Confocal laser scanning, Biomarkers, Rock-Eval.



Latest Pliensbachian–Toarcian eustatic calibration using shallow-marine sedimentological record coupled with basinal geochemical analyses

Krencker Francois-Nicolas ^{*1}, Fantasia Alicia ¹, El Ouali Mohamed ², Kabiri Lahcen ²
and Bodin Stéphane ¹

¹Department of Geoscience, Aarhus University - Denmark

²Department of Geoscience, Sciences and Techniques Faculty of Errachidia, - Morocco

Sea-level fluctuation is an important parameter controlling the sedimentation in deep-marine environments and influenced also the expansion of oxygen-depleted conditions in neritic settings during oceanic anoxic events (OAEs). Despite this fundamental role, sea-level fluctuation remains on a short timescale (<1 Myr) one of the least constrained parameters for numerous OAEs. Here we refine the sequence stratigraphic framework for the uppermost Pliensbachian–Toarcian with a special focus on the Toarcian OAE interval. This study is based on sedimentological and total organic carbon isotope data used to correlate 16 sections located in the central High Atlas (Morocco). Palinspastically, those sections formed a 50-kilometer proximal–distal transect along the northern Gondwana continental shelf, which allow reconstructing the shoreline migration through time and space. Our sequence stratigraphic interpretation is then compared to the geochemical signals (e.g. detrital index, chemical index of alteration) measured on samples collected in deep-environment settings from numerous basins distributed worldwide. Our study shows that the relative sea-level changes recorded in Morocco can be correlated over large distances across those basins, indicating that the relative sea-level changes were driven by eustatic fluctuations. This study gives insights into the relationship between relative sea-level fluctuations and the geochemical record.

Mots-Clés : Toarcian oceanic anoxic events, sequence stratigraphy, carbonate factory shutdown, Morocco



Polar sea temperature and $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ during the Toarcian Oceanic Anoxic Event.

Thomas Letulle^{*1}, Guillaume Suan¹, Mikhail A. Rogov², Mathieu Daëron³,
Arnauld Vinçon-Laugier¹, Bruno Reynard¹, Gilles Montagnac¹, Christophe Lécuyer¹.

¹ Laboratoire de Géologie de Lyon, CNRS UMR 5276, Univ Lyon, Univ Lyon 1, ENS Lyon - France

² Geological Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow - Russia

³ Paris-Saclay - France

The Toarcian Oceanic Anoxic Event (TOAE) is considered as one of the most severe carbon cycle perturbation of the Phanerozoic eon. It is widely accepted that the TOAE was associated with a massive injection of ^{13}C depleted carbon into the oceanic and atmospheric reservoirs, triggering a cascade of environmental changes that included seawater warming, enhanced continental weathering, and widespread anoxia. Temperature records of the TOAE, however, are currently restricted to $\delta^{18}\text{O}$ data from low paleolatitudes ($20\text{--}35^\circ\text{N}$) sites of the western Tethys. Temperature response of high latitudes remains unconstrained. Here, we present new mineralogical, clumped isotopes ($\Delta 47$) and stable isotopes data from lower Toarcian bivalve shells of *Dacryomya inflata*, from the Polovinnaya River succession (Siberia), that was deposited near the Early Jurassic North Pole ($>80^\circ$). Raman spectroscopy and SEM observation reveal that all investigated bivalve specimens retained their original aragonite mineralogy and pristine microstructural organization.

The bivalve shell $\delta^{13}\text{C}$ trends and absolute value (3.4 to 5.1‰ VPDB), together with published organic carbon $\delta^{13}\text{C}$ and biostratigraphic data, place our record within the rising limb of the TOAE positive carbon isotope excursion. The measured $\Delta 47$ imply high polar temperatures

(8 to 18.0 °C), in agreement with coeval Siberian paleobotanical data, and consistent with existing high-latitude paleotemperature proxy records of Cretaceous and Eocene warming events. The calculated seawater $\delta^{18}\text{O}$ values are relatively ^{18}O depleted (between -5 and -2‰ VSMOW), and fully agree with values predicted by previous Mesozoic ocean-atmosphere general circulation models. The reconstructed TOAE polar temperature, however, far exceed those been suggested by TOAE simulations and implied considerably more reduced

latitudinal thermal gradients. Our results provide some of the oldest $\Delta 47$ -based polar temperature estimates of the Phanerozoic and bring challenging but crucial constraints for numerical simulations of past greenhouse climates.

Keywords: Toarcian OAE, Paleotemperature, Sea water $\delta^{18}\text{O}$, Clumped isotopes, Ice free world



The palaeoenvironmental significance of the lower Toarcian - Lower Sulphur Band, Cleveland Basin, UK

Connor O'Keeffe ^{1*}, Crispin T.S. Little ¹, Christian März¹, Fiona Gill¹,

Christopher Vane², Simon Poulton¹

¹ School of Earth and Environment, University of Leeds, UK

² British Geological Survey, Keyworth, UK

In the Cleveland Basin (Yorkshire, UK) a thick unit of organic-rich, laminated black shales ('Jet Rock') occurs from the top of the Tenuicostatum Zone in the Grey Shales Member through the Exaratum Subzone of the overlying Mulgrave Shale Member. These shales were deposited under reduced oxygen (often euxinic) conditions, which excluded most benthic marine fauna. Although most of underlying Grey Shales Member was deposited under oxic conditions, there are three decimetre scale black shale units (the Sulphur Bands) in the Grey Shales that may presage later reduced oxygen events in the basin. Here, we present results from an ongoing, multiproxy, 0.5-centimetre-scale study of the earliest of these events: the Lower Sulphur Band (LSB). The LSB is lithologically heterogeneous, with bituminous, siliciclastic, cross-stratified, and intensely bioturbated fabrics represented. A sequential Fe extraction revealed that the LSB was highly enriched in reactive Fe species, and that pyrite formation was sulphur-limited. A bulk HF digest showed that the LSB was associated with Mn enrichment. This implies that Mn cycling took place along the chemocline of a stratified water column, in a basin subject to a rapid transgression during the lower Toarcian. Episodic enrichments in K/Rb, and the presence of two distinct sources of organic matter (Rock-Eval pyrolysis) suggest that episodes of enhanced fluvial flux from surrounding emergent areas also took place during the deposition of the LSB. Our results demonstrate a strong association between black shale deposition within the Cleveland Basin, and the development of highly ferruginous conditions. The biogeochemistry of the basin is also shown to be dependent on sea level and fluvial flux changes. This study highlights that temporally brief episodes of black shale deposition were sensitive to a wide range of palaeoenvironmental processes, and better constrains the impact of transient anoxia on benthic invertebrate communities (bioturbation).

Mots-Clés : Toarcian, Cleveland Basin, Redox, Lower Sulphur Band, Ferruginous, Mn Enrichment

* Intervenant



The use of gamma ray spectrometry and magnetic susceptibility as tools for interpreting environmental perturbations: the case of the Jenkyns Event (early Toarcian) from South Iberian Palaeomargin (Median Subbetic, SE Spain)

Matías Reolid ^{1*}, Emanuela Mattioli ^{2,3}, Jolanta Iwańczuk ⁴; Isabel Abad ¹

¹ Departamento de Geología, Universidad de Jaén,
Spain ² Univ Lyon, Univ Lyon 1, ENSL, CNRS,
LGL-TPE, France ³ Institut Universitaire de France
(IUF)

⁴ The Polish Geological Institute - National Research Institute, Poland

The Arroyo Mingarrón section (Median Subbetic, SE Spain) is composed by a marl-marly limestone alternation deposited during the Pliensbachian-Toarcian in the South Iberian Palaeomargin. This section shows evidences of hemipelagic influence due to the presence of ammonites and the abundance of radiolarians. The lower part of the section (uppermost Pliensbachian and Polymorphum Zone, NJT5 nannofossil Zone) is constituted by a yellowish marl and limestone alternation (wackestones to packstones of radiolarians). The Serpentinum Zone (NJT6 nannofossil Zone) is represented by blue-greyish marls with some levels of marly limestones (wackestones to packstones of radiolarians).

The application of magnetic susceptibility (MS) and gamma ray spectrometry (GR) to these deposits allows interpreting important environmental changes related to the fluctuations in the continental influx of terrigenous and phytodetritus in the base of the blue-greyish marls (NJT6a nannofossil Subzone). The increase of MS is related to the increment of terrigenous input and the abundance of pyrite framboids recrystallized to hematite. The increase of K, U and Th content from GR spectrometry is related to the enhanced input of terrigenous and phytodetritus from emerged areas as well as the organic matter accumulation.

The increase of terrigenous input was coincident with the negative carbon isotopic excursion (CIE) at the base of the NJT6 nannofossil Zone that characterizes the Jenkyns Event. Changes in the calcareous nannofossil assemblages point to the incidence of the Jenkyns Event in the sea-water column. The decrease of the abundance of *Mitrolitus jansae* during the negative CIE is related to sea-water stratification and poor oxygenation in the deep photiczone during the event. The integration of data from microfacies, mineralogy, MS, GR spectrometry and calcareous nannofossils allows interpreting the incidence of the Jenkyns Event in hemipelagic settings of South Iberian Palaeomargin.

Key words: Gamma ray spectrometry, magnetic susceptibility, calcareous nannofossil, biostratigraphy, negative CIE, Betic Cordillera



Changes in foraminiferal assemblages during the early Toarcian biotic crisis in the Portland-Wight Basin (Kerr McGee97/12-1 well, offshore southern England)

Matías Reolid ^{*1}, Nigel Richard Ainsworth ²

¹ Department of Geology, University of Jaén - Spain

² Cliff Bank, Sidmouth Road, Dorset, DT7 3EP – United Kingdom

The uppermost Pliensbachian-upper Toarcian sediments recovered from Kerr McGee 97/12-1 well (offshore southern England) were deposited in the Portland-Wight Basin and mainly consist of silty and calcareous claystones, marls, silty sandstones, and sandy limestones. In addition, in the early Toarcian black, locally organic-rich, claystones and silty claystones are recorded. The current study analyses the foraminiferal assemblages from the interval 408 – 518 m that has been assigned to the *Margaritatus* Zone (upper Pliensbachian) to the lower part of the *Psudoradosa* Zone (upper Toarcian). The foraminiferal assemblages are dominated by the suborders *Lagenina* and locally *Robertinina*. Three main ecostratigraphic intervals have been identified, based on changes in the foraminiferal assemblages that occurred before, during and after the sedimentation of the early Toarcian black claystones (correlative with the Early Toarcian Oceanic Anoxic Event, T-OAE).

Ecostratigraphic interval I (upper Pliensbachian) is characterized by a diverse assemblage with specialist, opportunist and intermediate forms, but dominated by *Lenticulina muensteri*. Abundance of foraminifera is relatively low. This assemblage is interpreted to represent a phase that pre-dates the biotic crisis.

The ecostratigraphic interval II, during the deposition of the black claystones, shows an abrupt increase in opportunist forms such as the genus *Reinholdella* (91%). The diversity is very low but the abundance of foraminifera, specially *Reinholdella macfadyeni* and *R. dreheri*, is very high. The top of the black claystones is an almost barren interval for foraminifera and other microfossils such as the ostracods. Only two specimens of *Trochammina eoparva* were recorded. This second interval represents the biotic crisis phase, probably in response to decreasing oxygenation.

The ecostratigraphic interval III (from upper part of the lower Toarcian to the upper Toarcian) is characterized by an increase of diversity and abundance of foraminifera, as well as the dominance of *Lenticulina* (> 85 %). Other infaunal forms are recovered such as *Nodosaria*, *Marginulina*, *Eoguttulina*, and *Palmula*. This assemblage is interpreted to reflect the increased availability of oxygen from deep-infaunal to epifaunal microhabitats and the return to normal conditions at the sea bottom. Ecostratigraphic fluctuations in the foraminiferal assemblages from Kerr McGee 97/12-1 well across the T-OAE event are comparable with those from Mochras Borehole, the Lusitanian Basin (Portugal), and the Atlasic Basin (North Africa).

Key words: Foraminifera, Jenkyns Event, opportunist, Lower Jurassic



Ostracod assemblages and environmental changes in the South iberian Palaeomargin during the early Toarcian: the incidence of the Jenkyns Event

Matías Reolid ^{*1}, Choukri Soulimane ², Wolfgang Ruebsam ³, Emanuela Mattioli ⁴

¹ Department of Geology, University of Jaén - Spain

² University of Tlemcen – Algeria

³ University of Kiel – Germany

⁴ University of Lyon – France

Important changes in the composition of ostracod assemblages have been recorded in lower Toarcian deposits of many Tethys basins. A faunal turnover, related to global environmental change (Jenkyns Event), occurred during the Serpentinum (Levisoni) Zone and was accompanied by the extinction of Suborder Metacopina represented by the Family Healdiidae. The analysis of ostracod assemblages from the well-studied La Cerradura section (Betic Cordillera, SE Spain) can improve the understanding of processes that triggered this turnover.

The upper Pliensbachian and lowermost Toarcian (Polymorphum Zone) of La Cerradura section are constituted by a marl-limestone rhythmite, that is overlain by a dark marls interval that represent the Serpentinum Zone. The lower part (~ 3.5 m) of this dark marl is characterized by the record of a negative carbon isotopic excursion (CIE) both for bulk rock and organic matter, as well as a minor increase on redox sensitive elements (RSE) and total organic carbon (TOC = 0.8%).

The ostracod assemblage of the upper Pliensbachian (Emaciatum Zone) is dominated by Family Healdiidae (*Ogmoconcha* and *Ogmoconchella*) and secondarily Bairdiidae and Pontocypridae. The Polymorphum Zone (lower Toarcian) is characterized by a diverse assemblage with dominance of Healdiidae, Bairdiidae and Pontocypridae. However, the beginning of the negative CIE coincides with a sharp decrease of percentage of Healdiidae and the rapid extinction. The diversity in the base of the Serpentinum Zone, debut of the negative CIE, coincides with the increase of Baridiidae and Cytherellidae. The size of some genera such as *Liassina* and *Bairdiacypris* decrease from the base of the Serpentinum Zone. After the negative CIE, diversity and abundance of ostracods recovered.

As sediments are not significantly enriched in RSE and TOC, oxygen-deficient conditions in pore and bottom were not the driver of the ostracod biotic crisis. Other processes related to the Jenkyns Event may be the cause, such as rising seawater temperatures and acidification. For this section, an increase in atmospheric CO₂ from about 500 to 1000 ppmv of CO₂ has been reconstructed during the Jenkyns Event. Rising CO₂ levels were paralleled by increasing sea surface temperature from 22 to 32 °C (~0.1 °C/kyr). At the same time, CaCO₃ contents fall from 80% to 32% and absolute abundance of calcareous nannoplankton drop. Decrease of deep-dweller *Mitrolithus jansae* indicates shoaling of the oxygen minimum zone or carbonate compensation depth. Probably Suborder Metacopina was more vulnerable to these changes.

Key words: Ostracods, Jenkyns Event, opportunist, Lower Jurassic



LINKING THE TOARCIAN OCEANIC ANOXIC EVENT WITH KAROO-FERRAR LARGE IGNEOUS PROVINCE VOLCANISM

Micha Ruhl ^{1,*}, Aisha Al-Suwaidi ², Stephen P. Hesselbo ²

¹ Department of Geology, Trinity College Dublin, The University of Dublin, Ireland

² Petroleum Institute, Khalifa University, Abu Dhabi, United Arab Emirates

³ Camborne School of Mines and Environment and Sustainability Institute, University of Exeter, Penryn Campus, UK

* Corresponding author: micha.ruhl@tcd.ie

The Early Jurassic Toarcian Oceanic Anoxic Event (T-OAE ; ~183 Ma) is marked by the widespread development of anoxic/euxinic conditions in response to climatic and environmental change, and major changes in the exogenic carbon cycle resulting from elevated carbon release and burial at that time. The rapid changes in Earth system processes associated with the T-OAE are often linked to Karoo-Ferrar Large Igneous Province (LIP) volcanism, but a direct, temporal (or causal) relationship is not very well established due to limited age-constraints on both the Karoo-Ferrar LIP itself as well as marine sedimentary successions comprising the T-OAE.

Here, we present new geochemical data and age-constraints on both biostratigraphically well-calibrated marine sedimentary successions and Karoo-Ferrar LIP volcanism and show a direct temporal relationship. This suggests that LIP volcanism did likely play a crucial role in (initiating) the events associated with the T-OAE.



Orbitally controlled depositional changes in the Pliensbachian and Toarcian western Tethys (La Cerradura, Subbetic, Spain)

Ricardo L. Silva ^{*1,2,3}, Micha Ruhl ^{1,2,3}, Cillian Barry ¹, Emma Blanka Kovács ^{1,3},
Matías Reolid ⁴, Wolfgang Ruebsam ⁵

¹ Department of Geology, Trinity College Dublin, The University of Dublin - Ireland

² Irish Centre for Research in Applied Geosciences (iCRAG) - Ireland

³ Earth Surface Research Laboratory, Trinity College Dublin, The University of Dublin - Ireland

⁴ Department of Geology, University of Jaen - Spain

⁵ Department of Geosciences, Christian-Albrecht University of Kiel – Germany

The Early Jurassic is marked by the transition from cooler (possibly icehouse) conditions in the Late Pliensbachian to the hothouse conditions of the Early Toarcian (~188–181 Ma). Climatic and environmental change at that time is interpreted to be linked to massive and abrupt carbon release into the atmosphere and oceans which, through positive and negative climatic feedback processes resulted in widespread oxygen-stressed conditions in many marginal marine basins, and the associated sequestration of carbon into sediments. Combined, greenhouse-gas release and widespread organic-carbon burial led to major perturbations in the Pliensbachian–Toarcian carbon cycle.

Within the context of the Early Toarcian record in Europe, the La Cerradura section from the Betic Cordillera stands out due to its low organic carbon content, persistent oxygenation, and position, bordering the southern Tethyan palaeo-margin. In this study, we present geochemical data from over 200 rock samples from the Upper Pliensbachian–Lower Toarcian at La Cerradura. Elemental geochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ were used to constrain changes in deposition, paleo-ocean chemistry, and paleoclimate in the study area, and was used to obtain a cyclostratigraphic framework for the studied succession. The objectives are to (1) constrain the timing of global carbon cycle change and (2) improve our understanding of palaeoclimatic and palaeoceanographic processes that operated during major climate change events in the Pliensbachian–Toarcian time interval.

Mots-Clés : sedimentology, geochemistry, astrochronology, Pliensbachian–Toarcian, Betic Cordillera, Spain



Assessing the most likely duration of the Toarcian Oceanic Anoxic Event using mass accumulation rates

Guillaume Suan^{*1}, Bernard Pittet¹, Emanuela Mattioli¹

¹ Univ Lyon, Univ Lyon 1, ENSL, CNRS, LGL-TPE, F-69622, Villeurbanne, France

The Toarcian Oceanic Anoxic Event (T-OAE; Early Jurassic) was a time of marked environmental perturbations, which led to the widespread deposition of organic-rich strata known as 'black shales'. The estimated duration of the T-OAE, however, ranges from 200 to more than 1000 ky, greatly limiting the appreciation of its likely causes and impact on global biogeochemical cycles. All published age models of the T-OAE interval are invariably based on astronomical cycle counts recorded in shelf strata, which are complicated by the large spatiotemporal changes in accumulation rates that characterize such settings. In this study, we assess the most likely duration of the T-OAE using reconstructions of mass accumulation rates (MAR) of different sedimentary components (total organic carbon, CaCO₃, non-carbonate fraction) in various basins using existing age models and available chemo- and bio-stratigraphic constraints. We find dramatic and geologically improbable increases in NCF, TOC and CaCO₃ across the T-OAE using all age models attributing the main stratigraphic cycles to precession or obliquity. By contrast, age models assuming a short eccentricity forcing lead to more subdued and realistic changes in MAR that seem more compatible with sedimentological and paleontological evidence. We thus conclude that the T-OAE lasted more than 1000 ky rather than 200 ky.

Mots-Clés : Toarcian OAE, Mass accumulation rate, cyclostratigraphy



Duration of the Early Toarcian, stratigraphic black holes and glacio-eustatism in a greenhouse world

Nicolas Thibault^{1*}, Wolfgang Ruebsam², Moujahed Al-Husseini³

¹ : IGN, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark

² : Department of Organic and Isotope Geochemistry, University of Kiel, Germany

³ : Gulf PetroLink-GeoArabia, Manama, Bahrain

The late Pliensbachian–Early Toarcian was characterized by major environmental instabilities that affected the carbon cycle, sea-level, climate, the biota and numerous geochemical cycles. The temporal and causal relationships between these phenomena remain matters of debate. This debate is sustained by a controversy over the nature of orbital components expressed across the negative carbon isotope excursion (CIE), over the continuity of its record and changes in sedimentation rate in sections around the world. An extensive review of stratigraphic data recently led Ruebsam and Al-Husseini (2020) to propose a Lower Toarcian carbon isotope reference curve calibrated by ammonite zones and subzones, 405 kyr cycles, and replaced within a framework of transgressive-regressive (T-R) sequences. Four major discontinuities were identified globally and named ‘stratigraphic blackholes’ (SBH). The present study refines the accuracy of this new integrated Time Scale and places in a common temporal framework environmental changes and the Karoo-Ferrar Large Igneous Province (K-F LIP). This timescale is tested for reference sections with a previously developed cyclostratigraphy and reveals a higher likelihood for a control by the 100 kyr over major steps of the negative CIE. The combination of 3rd order and 405 kyr-induced 4th order sea-level changes explains features of the CIE and the position of the 4 main SBH that relate with erosional unconformities, sequence boundaries and global cooling. The sea-level falls associated with the unconformities have amplitude of many tens of m that exceed by more than an order of magnitude falls associated with thermo-eustasy or aquifer-eustasy (Davies et al., 2020). We conclude that glacio-eustasy was a major controlling factor in the Toarcian “greenhouse” world and show that unconformities and highstands are consistent with the predictions of an Orbital Scale of glacio-eustasy (Matthews and Al-Husseini, 2010).

Keywords : early Toarcian, cyclostratigraphy, discontinuities, glacio-eustasy

References

Davies et al., 2020. *Cretaceous Research* 112, 104445

Matthews, R.K., Al-Husseini, M., 2010. *GeoArabia* 15, 155–167.

Ruebsam, W, Al-Husseini, M., 2020. *Gondwana Research* 82, 317–336



T11.2. Archives climatiques quaternaires et événements abrupts



Datation de formation glaciaire en Auvergne (Massif central, France) par nucléides cosmogéniques et reconstitutions paléogéographiques de la dernière déglaciation

Arthur Ancrenaz^{*1}, Emmanuelle Defive¹, Stéphane Pochat², Vincent Rinterknecht³, Laura Rodriguez-Rodriguez⁴, Alexandre Poiraud¹, Irene Schimmelpfennig³, Régis Braucher³, Vincent Jomelli³, Olivier Bourgeois², Didier Roche^{5,6}, Johannes Steiger¹

¹ Université Clermont Auvergne, CNRS, GEOLAB, France

² Laboratoire de Planétologie et Géodynamique, UMR 6112, CNRS, Université de Nantes, France

³ CEREGE, Aix Marseille Univ., CNRS, Collège de France, IRD, INRAE, France

⁴ Departamento de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada, Universidad de Cantabria, Espagne

⁵ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, CEA/CNRS-INSU/UVSQ, Gif-sur-Yvette, France

⁶ Department of Earth Sciences, Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam, The Netherlands

La chronologie relative des fluctuations des paléoglaciers d'Auvergne au cours du dernier cycle glaciaire n'a pas bénéficié de l'apport des nouveaux outils géochronologiques comme les Nucléides Cosmogéniques Terrestres (NCT) ou la Luminescence Optiquement Stimulée (OSL) jusqu'à aujourd'hui. Appliqués aux formations glaciaires des massifs du Cantal et de l'Aubrac, ces outils ont le potentiel de lever les incertitudes qui existent autour de l'âge du Maximum Glaciaire Würmien (MGW) et de la déglaciation. Nous présentons les âges d'exposition aux rayonnements cosmiques obtenus dans ces deux massifs. Les formes et formations glaciaires datées par ^{10}Be , ^{26}Al et ^{36}Cl sont reconnues sur le terrain et bien identifiées dans le cadre chronologique relatif construit à partir d'observations morpho-stratigraphiques. Ces données permettent de proposer un nouveau cadre chronologique des fluctuations glaciaires, basé sur des datations directes, dont les avancées glaciaires majeures, du Cantal et de l'Aubrac : MGW, Récurrence et stades internes sont synchrones des épisodes climatiques les plus rigoureux, enregistrés par ailleurs à l'échelle régionale. Cependant, durant le début du Tardiglaciaire, la déglaciation totale de l'Aubrac précède celle du Cantal. Cette divergence entre les deux massifs est contrôlée par l'action conjointe des conditions topographiques et paléoclimatiques, qui mettent en évidence des dynamiques paléoglacières contrastées. Enfin, ces résultats alimentent la reconstitution des paléoengagements à l'aide d'outils de modélisation (*GlaRe*, *Positive Degree-Day*), puis la reconstitution des paléogradient climatiques (thermiques et hygrométriques) qui prévalaient lors de ces stades glaciaires. Ces reconstitutions permettent d'explorer différents scénarii paléoclimatiques, notamment la part relative des flux atlantiques et/ou méditerranéens dans l'alimentation des paléoglaciers du Cantal et de l'Aubrac au cours du Dernier Maximum Glaciaire et du Tardiglaciaire.

Mots-Clés : géomorphologie, paléoglacier, nucléides cosmogéniques, paléoclimats, Cantal, Aubrac, Massif central



Paleoclimatic and paleoenvironmental evolution since the Late Glacial Period in Jura mountains: examples from the Lake Val (France) and the Amburnex peatland (Switzerland)

Brahimsamba Bomou ^{*1}, Damien Zappa ¹, Anne-Marie Rachoud-Schneider ²,
Jean-Nicolas Haas ³, Marina Gärtner ³, Jorge Spangenberg ¹, Vincent Bichet ⁴,
Thierry Adatte ¹

¹ Institute of Earth Sciences (ISTE), University of Lausanne, Switzerland.

² Musée et Jardins botaniques cantonaux, Lausanne, Switzerland

³ Department of Botany, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria

⁴ Laboratoire Chrono-Environnement, UMR 6249 du CNRS, UFR des Sciences et Techniques, Besançon, France.

Numerous glacial paleolakes took place in the Swiss and French Jura during the retreat of a Würm ice sheet. Two sites were investigated: the Amburnex Valley site (Switzerland), which evolved in well-developed peatland and the Lake Val (France), which is still persisted as a lacustrine system. During the Late Glacial period, both sites were glacial lakes characterized by a significant accumulation of lacustrine sediments.

Using a multiproxy approach, this project aims to reconstruct the paleoclimatic and the paleoenvironmental evolution recorded in lacustrine sediments and peatbog deposits since the last 13'000 years. The Amburnex core (7m) exhibit a basal morainic deposit from the Würm period, overlain by three meters of lacustrine deposits and four meters of peatland deposits. The Lake Val core (4.5m) consists of the same lithological succession. A multiproxy approach based on palynological analyses, grain-size analyses, mineralogical analyses (XRD) and geochemical analyses (TOC, Nitrogen, Phosphorus and Mercury contents; major and trace elements; organic carbon isotopes) have been used to characterize the hydrological and climatic fluctuations, the trophic level and the origin of organic matter in order to reconstruct the paleoenvironmental and paleoclimatic evolution of this area.

In the Amburnex site, the Bølling-Allerød, the Younger Dryas and the beginning of the Preboreal period have been recognized by palynological analyses and confirmed by carbon 14 dating. During the Oldest Dryas, oligotrophic conditions took place as suggested by the very low concentrations in nitrogen and organic matter. Then, during the warmer Bølling period, an enrichment in total organic carbon (TOC) associated with a decrease in phosphorus content are observed, implying the development of eutrophic conditions and maybe phosphorus recycling. Later in the Allerød period, low TOC and phosphorus contents, associated with varved carbonate deposits, indicate a return to more oligotrophic conditions. New organic matter enrichments are observed in the interval corresponding to the colder Younger Dryas period. These trends are quite consistent with those observed in the Lake Val and reflect significant changes in runoff and nutrient inputs at least at regional scale.

Mots-Clés : Paleoclimate, paleoenvironment, lacustrine deposits, Late Glacial, palynology, geochemical proxies



Halite fluid inclusions reveal seasonal temperature variability in the Middle East during the last interglacial

Niels Brall ^{*1, 2}, Véronique Gardien ¹, Philippe Sorrel ¹, Daniel Ariztegui ³, Frédéric Caupin ²

¹ LGL-TPE – Laboratoire de Géologie de Lyon : Terre, Planètes, Environnement - Villeurbanne, France

² ILM - Institut Lumière Matière - Villeurbanne, France

³ Department of Earth Sciences, University of Geneva, Switzerland

Past variations in seasonality help to understand climate mechanisms in continental environments and to predict future scenario with ongoing climate warming. Seasonality (i.e., summer - winter) depends on complex atmospheric circulation patterns and controls the hydrochemistry of lakes wherein sediment deposits represent single events or periods of stable lake conditions by different lithological facies (i.e., clay, gypsum, salt, carbonates). Various methods exist in order to analyze climate proxies (i.e., temperature) that are derived from chemical, physical or organic properties of geological records.

However, direct and precise measurements of past water temperatures in lake sediments are still lacking. This results in a need to estimate past hydrological conditions (i.e., $\delta^{18}\text{O}$ of water) for paleoclimate interpretations, rather than interpreting absolute datasets. Therefore, there is a need to directly determine paleo water temperatures in geological lake sediments especially in salty environment where other proxies (fauna) are scarce.

Saline lakes accumulate salt layers (i.e., halite), controlled by local seasonal conditions. During halite growth, small water droplets (fluid inclusions; FIs) with a specific density are entrapped in crystal defects of the host mineral. The density depends only on the temperature at time of entrapment, thus FIs can record initial lake water temperatures. Brillouin Spectroscopy is a precise and direct method to obtain the entrapment temperature of FIs (and so the water temperature in which halite formed). This method was applied on an evaporitic series from the hypersaline Dead Sea where a bore core yields annual halite deposition cycles during the begin of the last interglacial (~ 130 ka). Analogues found in the modern Dead Sea are interpreted to be controlled by summer and winter processes. We thus measured the entrapment temperatures of primary FIs for an interval of three consecutive years in coarse halite deposits.

We found a seasonal signature in each halite layer by "warming upward" cycles, with lowest and highest entrapment temperatures at the base and the top of each layer, respectively. Both minimum and maximum temperature data are 2-4 °C lower than modern Dead Sea deep lakewaters, however our data indicate that seasonality was about as twice as high as today.

Mots-Clés : fluid inclusions, seasonality, halite, entrapment temperatures, Dead Sea, Brillouin Spectroscopy



Déviat ion et variation de l'intensité du courant de Kuroshio dans la mer des Philippines, au nord-est de Taiwan, depuis le dernier maximum glaciaire

Pierrick Fenies ^{1*}, Clément Frigola ¹, Maria-Angela Bassetti ¹, Natalia Vazquez Riveiros ², Nathalie Babonneau ³, Gueorgui Ratzov ⁴

¹ Centre de formation et de recherche sur les environnements méditerranéens (CEFREM) – CNRS : UMR5110, Université de Perpignan Via Domitia, France

² Laboratoire Géodynamique et enregistrement Sédimentaire (PDG-REM-GM-LGS), Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), France

³ Laboratoire Géosciences Océan – CNRS : UMR6538, Université de Bretagne Occidentale (UBO), France
⁴ Laboratoire GéoAzur – CNRS : UMR7329 et IRD : UR082, Université Côte d'Azur (UCA), France

Le courant de Kuroshio assure la redistribution des eaux et de la chaleur des basses latitudes. Ce courant appartient au gyre océanique subtropicale du Pacifique Nord. Il est la prolongation du courant nord-équatorial qui prend naissance dans la « Warm Pool » Indo- Pacifique et qui bifurque en deux branches, aux alentours de 13°N à l'ouest de l'archipel des Philippines : l'une descendant vers le sud et formant le courant de Mindanao, l'autre remontant vers le nord et formant le courant de Kuroshio. À l'actuel, ce dernier longe la côte orientale de Taiwan avant d'entrer dans la mer de Chine orientale par la dépression de Yonaguni qui sépare Taiwan de l'archipel de Ryūkyū. Si de nos jours le courant de Kuroshio présente une certaine stabilité, il n'en a pas été de même au cours des cycles climatiques passées, notamment au cours des derniers 30 000 ans.

En effet, l'intensité et le chemin emprunté par le Kuroshio, notamment au dernier maximum glaciaire, sont débattus du fait des variations de la position du gyre subtropicale nord pacifique, de la baisse du niveau marin et de la présence de hauts fonds reliant l'archipel de Ryūkyū et l'île de Taiwan. Il est ainsi supposé deux hypothèses contrastées au dernier maximum glaciaire : (i) une déviation de Kuroshio qui longerait alors l'arc de Ryūkyū par sa bordure orientale ou (ii) le maintien de ce dernier dans la mer de Chine orientale mais avec un transport réduit.

Cependant, ces études se basent essentiellement sur des données provenant de la fosse d'Okinawa en mer de Chine orientale. Les données présentées ici proviennent de deux carottes sédimentaires (MD18-3523 ; MD18-3532) prélevées en 2018 au cours de la campagne EAGER dans la zone du prisme d'accrétion de Ryūkyū, en mer des Philippines. La fraction inférieure à 2 µm des sédiments a été analysée par diffractométrie à rayon-X pour la quantification des minéraux argileux. Un modèle d'âge préliminaire permet d'estimer une période de temps d'environ 20 ka couvert pour la MD18-3523 et de 30 ka pour la carotte MD18-3532.

L'analyse des minéraux argileux a ainsi permis de reconstituer les changements dans le courant de Kuroshio en mer des Philippines, au nord-est de Taiwan, pendant les événements climatiques rapides de la déglaciation.

Mots-Clés : Kuroshio, LGM, Minéraux argileux, Taiwan, EAGER



Reconstruction des $p\text{CO}_2$ atmosphériques quaternaires par la géochimie des coccolithes

Camille Godbillot^{1*}, Michaël Hermoso², Fabrice Minoletti¹

¹ Sorbonne Université, Institut des Sciences de la Terre de Paris (UMR 7193 ISTeP), Paris, France

² Université du Littoral Côte d'Opale, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (UMR 8187 LOG), Wimereux, France

Pour les périodes géologiques où les mesures directes sur carottes de glace ne sont pas possibles, la reconstruction de paramètres clés des paléoclimats tels que la température ou la $p\text{CO}_2$ ne peut se faire qu'à partir de proxies et d'une archive climatique fiable. Les biominéraux calcitiques, provenant par exemple des foraminifères, représentent une archive de choix depuis près de 70 ans et sont utilisés pour déterminer les SSTs et pH passées. Malgré leur omniprésence dans les sédiments carbonatés, les coccolithes restent quant à eux relativement sous-exploités dans les études paléoenvironnementales, en raison notamment de leur petite taille qui les rend difficiles à isoler du reste du sédiment. Pourtant, des études de culture en laboratoire de leur producteurs, les coccolithophoridés, ont montré que l'isotopie des coccolithes était sensible à des variations de CO_2 dans le milieu, dont ces algues dépendent pour assurer leur activité métabolique. Des calibrations empiriques *in vivo* ont ouvert la voie à l'utilisation de cette archive pour de nouveaux marqueurs paléoclimatiques. A partir d'un protocole de séparation de sédiments en classes micrométriques, nous nous proposons d'explorer le potentiel de la géochimie des coccolithes des sédiments carbonatés comme proxy du CO_2 aqueux sur la période quaternaire.

La calibration du proxy, première étape de cette étude, repose sur des analyses isotopiques en oxygène et carbone effectuées sur les fractions monospécifiques obtenues à partir d'échantillons de la carotte nord-atlantique MD95-2037 couvrant la Terminaison II. En utilisant l'enregistrement de $p\text{CO}_2$ de Vostok et les SSTs disponibles pour la même période, nous sommes en mesure d'établir une fonction de transfert entre les concentrations en CO_2 aqueux et les effets vitaux des coccolithes, et de comparer cette calibration obtenue en milieu naturel aux données de culture disponibles.

La deuxième étape consiste à reconstruire les $p\text{CO}_2$ manquantes pour les périodes plus anciennes que 800 ka. En particulier, l'application de notre démarche à la transition mi-pléistocène (900-1250 ka) à partir du site U1313 permettra de contraindre les changements dans la chimie du système carbone probablement à l'origine du changement de rythme des cycles glaciaires-interglaciaires de 41 à 100 ka.

Mots-Clés : Coccolithes, Proxy de $p\text{CO}_2$, Cycles glaciaires-interglaciaires



A conceptual model for ice age modelling

Gaëlle Leloup^{*1,2}, Didier Paillard²

¹ Agence Nationale pour la Gestion des déchets radioactifs (ANDRA)- France

² Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) - France

Variations of the Earth's orbital parameters are known to pace the ice volume variations of the last million year [1], even if the precise mechanisms remain unknown. Several conceptual models have been used to try to better understand the connection between ice-sheet changes and the astronomical forcing. An often overlooked question is to decide which astronomical forcing can best explain the observed cycles.

A rather traditional practice was to use the insolation at a some specific day of the year, for instance at mid-july [2] or at the june solstice [3].

But it was also suggested that the integrated forcing above some given threshold could be a better alternative [4]. In a more recent paper, Tzedakis et al. [5] have shown that simple rules, based on the original Milankovitch forcing or caloric seasons, could also be used to explain the timing of ice ages.

Here we adapt and simplify the conceptual model of Parrenin and Paillard 2003 [6], to first reduce the set of parameters.

Like in the original conceptual model from [6], this simplified conceptual model is based on climate oscillations between two states: glaciation and deglaciation. It switches to one another when crossing a defined threshold. While the triggering of glaciations is only triggered by orbital parameters, the triggering of deglaciations is triggered by a combination of orbital parameters and ice volume.

Then, we apply the different possible forcings listed above and we try to adapt the model parameters to reproduce the ice volume record, at least in a qualitative way.

This allows us to discuss which kind of astronomical forcing better explains the Quaternary ice ages, in the context of such simple threshold-based models.

Références :

- [1] Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages, Hays et al., 1976, Science
- [2] Modeling the Climatic Response to Orbital Variations, Imbrie and Imbrie, 1980, Science
- [3] The timing of Pleistocene glaciations from a simple multiple-state climate model, Paillard, 1998, Nature
- [4] Early Pleistocene Glacial Cycles and the Integrated Summer Insolation Forcing, Huybers et al., 2006, Science
- [5] A simple rule to determine which insolation cycles lead to interglacials, Tzedakis et al., 2017, Nature
- [6] Amplitude and phase of glacial cycles from a conceptual model, Parrenin Paillard, 2003, EPSL.

Mots-Clés : ice age, conceptual model



Meridional shifts of the South Westerly Winds over the Southern Atlantic Ocean over the last 40 ka

Ophélie Lodyga ^{1,*}, Blaise Gravier ¹, Valentine Schaaff ^{1,2}, Stephen J.G. Galer ²,
JuliaGottschalk ³, Gerald Haug ², Sylvain Pichat ^{1,2}

¹ Univ Lyon, ENSL, Univ Lyon 1, LGL-TPE, F-69007 Lyon, France

² Max Planck Institute for Chemistry, Climate Geochemistry, 55128 Mainz, Germany

³ Institute of Geosciences, Kiel University (CAU), 24118 Kiel, Germany

The position and strength of the South Westerly Winds (SWW) play an important role in Earth's climate since they control both the Southern Ocean vertical stratification and dust inputs to the area. The latter regulate the biological carbon pump north of the Polar Front, being the primary source of iron, a limiting micronutrient. The observed variations in atmospheric CO₂ during the Antarctic Isotopic Maximum (AIM) events could be linked to changes in the primary productivity in the Southern Ocean, as the result of SWW pattern modifications. However, meridional and intensity shifts of the SWW during the Quaternary abrupt events still remain largely debated.

We reconstruct the atmospheric circulation patterns over the last 40 ka using radiogenic isotopes (Pb, Nd and Sr) measured on the <10 µm detrital fraction of core MD07-3076Q (14°13.70'W, 44°9.20'S, 3,770m water depth) as tracers of dust sources to the Atlantic Southern Ocean. There are variations in the radiogenic isotopic compositions both at the Glacial/Interglacial and millennial (AIM8) time scales attesting changes in dust provenance. We also show that the dust flux is reduced during AIM 8.

Statistical analyses show that two main dust sources dominate the radiogenic isotopes variability. However, during AIM 8, a third source also contributes to core site MD07-3076Q. The radiogenic isotopes data show that the two main dust sources are Patagonia and the high altitude North Puna Plateau. North Central Western Argentina, another high altitude area, is likely to constitute the dust source contributing during AIM 8. During MIS 2, when the dust flux peaks, the main dust contributor is Patagonia. The North Puna Plateau relative contribution increases during the warm AIM 8 as well as during the Holocene. However, our results show that the atmospheric circulation patterns during AIM8 and the Holocene were different with a third source contributing during AIM 8. Finally, during AIM 8, our data support a southward shift of the SWW compared to their glacial position, *i.e.* over the Patagonian/Tierra del Fuego ice sheet. Such a shift would explain the greater relative contributions of the high altitude North Puna and North Central Western Argentina compared to Patagonia and the overall reduction of the dust flux. This southward shift of the SWW during AIM 8 is in agreement with a recent study [1] showing a positive coupling between an enhanced deep Southern Ocean ventilation and a decrease of the biological pump efficiency that explains the higher atmospheric CO₂ concentrations observed during AIM events.

[1] Jaccard et al., 2016, doi:10.1038/nature16514

Mots-Clés : Dust; Southern Ocean; Antarctic Isotopic Maximum; South Westerly Winds; Radiogenic Isotopes





Glaciations de faible altitude au Pléistocène moyen : l'exemple des Monts du Beaujolais (France). Conséquences climatiques et régionales de l'émission de flux atmosphériques centrifuges par les glaciers de piémont alpins

Bruno Rousselle *

* Géoparc Beaujolais UNESCO, Villefranche-sur-Saône - France

Une étude inédite (Rousselle 2019) a mis en évidence l'existence insoupçonnée dans les Monts du Beaujolais de témoins sédimentologiques et géomorphologiques de quatre glaciations du Pléistocène moyen. L'instauration d'épisodes glaciaires de cet âge sur cet axe montagneux de faible altitude, limitant à l'ouest une partie du domaine glaciaire alpin, est mise en rapport avec l'influence climatique et régionale des flux atmosphériques (vents catabatiques) provenant des grands glaciers de piémont alpins qui occupaient alors le bassin Lyonnais et le plateau de la Dombes.

Une analyse détaillée des terrains superficiels à galets et blocs qui recouvrent certains coteaux et certaines terrasses étagées du Beaujolais viticole a en effet révélé la présence de marques des phénoménologies glaciaires, fluvio-glaciaires et glacio-lacustres (lacs glaciaires du val de Saône) : fractures de broutage (*chattermarks*) et broutures, stries, usures et polis glaciaires, fractures de percussion, débris de roche et blocs « coulés » (*Ice Raft Debris, dropstones*) et structures d'impact (*dropstones structures*). Parmi ces dépôts, des lanières argilo-caillouteuses, planes, faiblement inclinées et pour partie remarquablement conservées ont une architecture sédimentologique et morphologique qui s'accorde parfaitement avec celle des systèmes proglaciaires de vallée (*valley sandurs*), sur les coteaux et dans les vallées intérieures, et de plaine (*outwash plains*), sur les bordures de la plaine de Saône.

Ces nouvelles observations diffèrent des hypothèses qui avaient eu jusque-là la faveur de la communauté scientifique et qui mettaient en avant des mécanismes alluviaux ou pédologiques reliés aux processus morphogénétiques à l'oeuvre dans le Massif Central et sur ses bordures à la fin du Néogène.

En outre, la théorie couramment admise considérant les multiples systèmes morphologiques et sédimentaires de la Dombes glaciaire comme le fait d'une unique glaciation nécessite aujourd'hui d'être réévaluée.

Mots-Clés : Glaciations, paléoclimatologie régionale, Pléistocène moyen, Beaujolais, Dombes, France.



Cosmogenic exposure dating of the last glacial extension in western French Alps.

Thibault Roattino^{*1}, Jean-François Buoncrisiani², Christian Crouzet¹, Riccardo Vassallo¹, Julien Carcaillet³, Natacha Gribenski⁴, Pierre Valla³

¹Savoie Mont-Blanc University, Grenoble Alpes University, CNRS, IRD, IFSTTAR, ISTERRE, France

²Biogéosciences, UMR 6282 CNRS, Bourgogne Franche-Comté University, France

³Grenoble Alpes University, Savoie Mont-Blanc University, CNRS, IRD, IFSTTAR, ISTERRE, France

⁴Bern University, Institute of Geological Sciences, Switzerland

According to paleoclimate proxies, two temperature minima occurred throughout the last ice age and correspond to the marine isotope stages MIS 4 and MIS 2. The Last Glacial Maximum (LGM) corresponds to the coldest period during MIS 2. In the European Alps, glaciers formed large foothill lobes reaching maximum extent during this period. OSL dating of glacio-fluvial deposits in front of the western French Alps glaciers reveals large ancient advances in the foreland during MIS 4 and the end of MIS 3. However, the extension of the LGM has not yet been recorded by chronological data. This study focuses on the foreland moraines of the western French Alps located about 20 km east of the city of Lyon. These numerous moraine ridges, well preserved in the piedmont landscape, are bounded to the north by the southern Jura and to the south by Miocene hills. In the study area, we sampled quartz-rich boulders to obtain exposure ages. We performed in-situ beryllium-10 (¹⁰Be) cosmogenic ages on quartz from 21 sampled boulders in order to reconstruct the palaeogeography of these glaciers during the LGM. 17 of the 21 samples give exposure ages between 23.81 ± 1.12 and 12.94 ± 0.85 ka, covering the LGM and Lateglacial periods. 4 outliers are much older or younger, involving pre- or post-depositional processes. The Lateglacial exposure ages are synchronous with the radiocarbon dates of the postglacial deposits and human occupations within the study area. The Lateglacial exposure ages are probably the result of exhumated erratic boulders following the degradation of moraines. These moraines are the remains of a glacial advance in the western French Alps during the LGM. Our results using new cosmogenic exposure ages on erratic boulders clearly show that during the LGM, the glaciers of the western French Alps reached the foothills again, where the palaeogeography of glacial extensions is complex. The old advances and the LGM extension are superimposed in the southern Jura and the Miocene hill areas. In the foreland plain, the LGM advance is less important than the old extensions (MIS4-MIS3). This new LGM palaeogeography of the western French Alps shows an interesting similarity with the western Italian Ivrea and Rivoli-Avigliana glacier lobes, sharing the same accumulation zone with the studied glaciers.

Key words: LGM, Glaciers, French Alps, Lyonnais, ¹⁰Be exposure ages, paleogeography



Les diatomées lacustres du Trou au Natron (Tibesti, Tchad) :nouvelles perspectives sur le climat du Sahara à l'Holocène

A.N. Yacoub ^{1,2*}, F. Sylvestre ^{1,2}, A. Moussa ², P. Hoelzmann ³, M. Dinies ^{3,4}, A. Alexandre ¹, M. Couapel ¹, J.C. Mazur ¹, C. Paillès ¹, C. Sonzogni¹, S. Kröpelin⁵

(1) CEREGE, Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, Collège de France, INRAE, Europôle de l'Arbois, Aix en Provence, France

(2) Université de N'Djamena, N'Djamena, Tchad; (3) Freie Universität Berlin, Institut für Geographische Wissenschaften Physische Geographie, Berlin, Germany

(4) German Archaeological Institute, Berlin, Germany; (5) Africa Research Unit, Institute of Prehistoric Archaeology, University of Cologne, Germany

*Contact : yacoubabdallah@yahoo.fr

Au cours de l'Holocène (0-11.7 ka BP), les régions subtropicales d'Afrique ont été marquées par des changements climatiques très significatifs. Ces changements ont été mis en évidence par les variations des niveaux des lacs qui reflètent la balance entre Précipitation et Evaporation (P-E) à l'échelle des bassins versants. Ces conditions climatiques ont été principalement contrôlées par la fluctuation de l'activité de la mousson, elle-même modulée par l'insolation d'été et les paramètres orbitaux. Ce mécanisme explique les conditions humides observées de 11 ka BP à 5,5 ka BP dans la zone sahélo-saharienne. Cette période, appelée « Sahara Vert » ou « Période Humide Africaine », a été caractérisée par un paysage verdoyant, couvert de prairies et d'arbres, parsemé de nombreux lacs, et incisé par de grands réseaux fluviaux. Malgré les nombreuses études réalisées sur la période humide africaine, aucune étude détaillée n'a été effectuée sur les archives lacustres observées dans le massif du Tibesti.

Pour la première fois, des séquences sédimentaires lacustres ont été échantillonnées en continu dans les massifs volcaniques du Tibesti, plus précisément dans le cratère du Trou au Natron (900 m de profondeur) situé au pied du Pic Toussidé (3 315 m d'altitude) en vue de reconstituer l'évolution du climat dans le Sahara central au cours de la période humide holocène à partir de la composition isotopique en oxygène des diatomées et de leur assemblage taxonomique.

La mesure de la composition isotopique en oxygène des diatomées est réalisée par la technique de fluorination laser IR au laboratoire des isotopes stables du CEREGE équipé d'un spectromètre de masse couplé à une ligne d'extraction de l'oxygène à partir des silicates. La silice des diatomées est purifiée au laboratoire de préparation micropaléontologique du CEREGE après élimination des carbonates et la matière organique. La détermination des assemblages taxonomiques des diatomées est effectuée par comptage sur un microscope photonique avec un objectif à immersion. L'unité de comptage est la valve avec un minimum de 400 valves comptés pour chaque échantillon.

Les résultats préliminaires portent sur deux séquences prélevées dans le Trou au Natron, W99 située sur les bords du cratère et JK48 située à proximité du fond de la caldeira, séparées par 330 m d'altitude. Ces deux enregistrements couvrent la période humide holocène et mettent en évidence des variations significatives du niveau du lac.

Mots-Clés : Afrique ; Sahara ; Holocène ; diatomées ; $\delta^{18}\text{O}_{\text{diatomées}}$



Automatic recognition of microfossils using convolutional neural networks : applications of a high-through put workflow for paleoceanographic reconstructions and biostratigraphy

Thibault de Garidel-Thoron ^{*1}, Ross Marchant ², Michael Adebayo ¹, Martin Tetard ¹

¹CEREGE–Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, Coll. de France, INRAE-France

²Queensland University of Technology -Australie

Recent progresses in image processing, and image recognition have paved the way for automated procedures to classify natural objects such as microfossils, and notably foraminifera. Foraminifera are among the most useful tracers in biostratigraphy and paleoceanography. Yet, the protocol used to extract and recognize the foraminifera did not change since the mid-18th century: manual picking using a brush with a stereomicroscope.

The most recent breakthrough is the development of image identification using convolutional neural networks, approach now widely used in biology. Here we present the results we achieve by developing the MiSo -Microfossil Sorter -automaton, to automatically pick microfossils from the sediment coarse fraction. This automated system, built with ATG Technologies, is fully operational and works 24/7 at CEREGE. In this study, we will detail the basic workflow of the automaton, processing ~8000 particles/day, and its ability to cope with the large morphological and structural variability of particles encountered in real, marginal to deep-sea sediments. We use convolutional neural networks adapted and trained on deep sea sediment samples to classify the coarse sediment particles, including planktonic and benthic foraminifera. Our integrated software is free of use and available here :<https://particle-classification.readthedocs.io/>.

We will compare a set of paleoceanographic records generated by a micropaleontologist with the ones generated by our automaton: relative abundance, fragmentation rate, biometrical changes. We have studied a set of deep-sea cores from the equatorial Pacific and the Mediterranean Sea to document past hydrographic changes in the late Quaternary, achieving millennial scale resolution through the last deglaciation. Using the automaton, we processed more than 1,000,000 foraminifera. The accuracy of recognition typically ranges around 85 to 95% depending of the morphoclasses and of the CNN used for the training. Morphoclass size probability density function and assemblages derived from the CNN will be compared to multi-proxy (micropaleontological and geochemical) records. We will discuss the ongoing applications of our workflow, from foraminifera to pteropods or terrigenous particles in deep sea sediments, and the recent updates of our system to different applications.

Mots-Clés : Foraminifera, microfossils, image recognition, neural network, biostratigraphy, paleoclimatology



T11.3. Changements paléoenvironnementaux et paléoclimatiques au cours du Phanérozoïque



Orbital Turning of the upper Albian from the site U1513D – Palaeoenvironmental implications

Ait-Itto Fatima-Zahra ^{*1&2}, Martinez Mathieu¹, Batenburg Sietske J.³, Huber Brian⁴, Jones Matthew M.⁵

¹ Géosciences Rennes, Univ Rennes, CNRS, – UMR 6118, 35000 Rennes, France

² Institut des Sciences Chimiques de Rennes, Univ Rennes, CNRS, 35042 Rennes, France

³ Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Martí i Franquès, Facultat de Ciències de la Terra, Barcelona, Spain

⁴ National Museum of Natural History, Smithsonian Institution, Washington, DC 20560, USA

⁵ Department of Earth and Environmental Sciences, University of Michigan, Ann Arbor, MI, 48104 USA

An exceptional record of Cretaceous climate and carbon cycle perturbations was recovered at Site U1513 in the Mentelle Basin, southwest of Australia at a paleolatitude of 60°S, during IODP Expedition (Huber et al., 2019). However, sediments across the Albian–Cenomanian transition (307.10 to 282.61 m) are barren of microfossils, and this lack of biostratigraphic indicators limits our ability to study paleoenvironmental change. Here we present results from cyclostratigraphic analyses, which provide new age constraints for the Albian-Cenomanian boundary. Time series analysis of high-resolution (2 cm) elemental data obtained through XRF core-scanning and natural gamma radiation confirm the influence of orbital forcing. Filtering the 3.5 m periodicity, which likely corresponds to the short (100 kyr) component of eccentricity-modulated precession, leads to a duration estimate of $64 \times 100 = 6.4$ Myr for the interval covering the Albian–Cenomanian transition (from 387m to 285.45 m). Independently derived logging data of natural gamma radiation reveal a similar number of short eccentricity cycles. The barren interval contain 23 cycles of short eccentricity suggesting a duration of $23 \times 100 = 2.3$ Myr. The clear expression of short eccentricity cycles allows us to estimate the duration of the barren interval at 2.3 Myr. This astronomical time scale provides an age model to reconstruct the timing of changes in Cretaceous oceanography and sedimentation in the Mentelle Basin, and highlights the sensitivity of southern high latitude paleoclimate to eccentricity forcing.

Keywords: IODP, U1513D, Orbital Turning, Upper Albian

Huber et al. 2019. Site U1513. In Hobbs, R.W., Huber, B.T., Bogus, K.A., and the Expedition 369 Scientists, *Australia Cretaceous Climate and Tectonics*. Proceedings of the International Ocean Discovery Program, 369: College Station, TX (International Ocean Discovery Program).



Caractérisation du gradient latitudinal de températures au Paléogène : une analyse *multi-proxies* sur *Subbotina linaperta* (foraminifère planctonique)

Béatrice Below^{*1, 2}, Christopher P. A. Smith³, Delphine Desmares¹, Delphine Dissard²,
Maxime Tremblin⁴, Jérémie Bardin¹, Florence LeCornec², Loïc Villier¹ & Bruno Turcq²

¹ Centre de recherche en paléontologie (CR2P) : UMR 7207–SU - MNHN - CNRS, France

² Laboratoire d'océanographie et du climat (LOCEAN/IPSL) : UMR 7159–IRD-CNRS-MNHN-SU, France

³ Biogéosciences: UMR 6282– CNRS-Université Bourgogne Franche-Comté, France.

⁴ Département des Sciences de la Terre, Université de Genève, Suisse

Les reconstructions climatiques du Paléogène reposent en grande partie sur l'utilisation de marqueurs géochimiques (Mg/Ca, $\delta^{18}\text{O}$). Toutefois, leurs signaux sont souvent oblitérés par la diagenèse et, leur lecture est compliquée par la méconnaissance de la chimie de l'eau de mer. La porosité des tests des foraminifères planctoniques peut représenter une alternative, d'une part car sa réponse est indépendante des proxies géochimiques et des incertitudes qui leur incombent et car elle dépendrait d'autre part des températures des masses d'eau dans lesquelles les foraminifères évoluent.

Subbotina linaperta, espèce de sub-surface, a été sélectionnée pour sa bonne répartition spatio-temporelle au Paléogène. Cinq sites ont été échantillonnés : DSDP 549 (43°N), DSDP 401 (47°N), ODP 689/690 (68°S), ODP 865 (18°N). Ces sites permettent l'accès à un enregistrement continu sur 40 Ma. Les valeurs de porosité, Mg/Ca, Sr/Ca, $\delta^{18}\text{O}$ de *S. linaperta* y ont été documentés.

Les résultats montrent une distribution latitudinale des valeurs de porosité et de températures. Une diminution de la porosité au cours du temps est observée à chaque latitude et retrace, en accord avec les températures issues du $\delta^{18}\text{O}$, le refroidissement global qui s'amorce à l'Eocène. Les températures issues du Mg/Ca et Sr/Ca concordent avec celles issues du $\delta^{18}\text{O}$, et rendent compte des événements hyperthermiques tel que le PETM. Toutefois, la tendance au refroidissement est moins prononcée que celle observée avec les autres proxies.

Notre approche multi-proxies montre que l'inclusion du Sr/Ca dans l'équation de reconstruction des températures dérivée du Mg/Ca améliore les reconstructions en limitant les biais liés aux autres paramètres environnementaux. Toutefois, la méconnaissance des teneurs en Mg/Ca et Sr/Ca de l'eau de mer au Paléogène représente une source d'erreur non négligeable. En parallèle, les données de porosité identifient les signatures géochimiques aberrantes et complètent les enregistrements.

Mots-Clés : Paléogène, foraminifère planctonique, Mg/Ca, Sr/Ca, $\delta^{18}\text{O}$, porosité, paléo-températures, gradient de températures

* Intervenante



Precession-driven monsoonal activity controlled the development of the early Albian Paquier oceanic anoxic event (OAE1b): Evidence from the Vocontian Basin, SE France

Asmahane Benamara ¹, Guillaume Charbonnier ^{*,1,2}, Thierry Adatte ¹, Jorge E. Spangenberg ³, Karl B. Föllmi ¹

¹ Institute of Earth Sciences, University of Lausanne, Géopolis, CH-1015 Lausanne, Switzerland ² Sorbonne Université, Institut des Sciences de la Terre Paris, UMR 7193, F-75005 Paris, France

³ Institute of Earth Surface Dynamics, University of Lausanne, Géopolis, CH-1015 Lausanne, Switzerland

In the Vocontian Basin in southeastern France, the Aptian-Albian boundary is marked by the occurrence of four laminated black shales (Jacob, Kilian, Paquier, Leenhardt) corresponding to Oceanic Anoxic Event 1b (OAE1b). Here, we performed an integrated multi-proxy high-resolution study on the section at l'Arboudeysse in the northwestern part of the Vocontian Basin including mineralogical (whole rock and clay minerals) and geochemical (carbon and oxygen isotopes, organic matter, major and trace elements, mercury contents) analyses. The aim of this study is to reconstruct the level of productivity and related state of oxygenation, in addition to the weathering conditions on the adjacent continent during the Paquier event. Modest enrichments in redox-sensitive trace elements (RSTE; Mo, As, V, U, Ni) associated with moderate total organic carbon contents (between 0.57 and 5.52 wt. %) indicate the development of suboxic/anoxic conditions during deposition of the Paquier level. The strong enrichment of Mo (10-229) relative to other RSTE (<5) may be explained by the importance of a particulate Fe-Mn oxyhydroxide shuttle. The high phosphorus (P) contents are related to the presence of fish remains. The weathering and detrital indices estimated from clay and whole-rock mineralogy suggests temporal fluctuations in weathering conditions and detrital input, likely resulting from variable humid conditions. These variations display a cyclic pattern linked to Milankovitch precession cycles varying from humid, high weathering conditions, causing oxygen-depletion in the bottom water to dryer, low weathering conditions associated with less oxygen depleted bottom waters. This oscillation was probably controlled by changes in evaporation/precipitation patterns related to variably intense monsoonal activity. A lack of significant mercury enrichments is not supportive of a direct link between volcanic activity and environmental change during the Paquier event.

Keywords: weathering conditions; redox conditions; mercury; geochemistry; phosphorus.



Enregistrement du cycle du carbone à la transition Oxfordien inférieur-moyen dans l'est du Bassin de Paris

Justine Blondet¹, Pierre Pellenard^{*1}, Chloé Morales², Philippe Landrein³,
Johann Schnyder⁴, François Baudin⁴, Olivier Mathieu¹, Anne-Lise Santoni¹,
Ludovic Bruneau¹

¹Laboratoire Biogéosciences, UMR CNRS 6282/uB, Université Bourgogne Franche-Comté, France

²INGEN - Innovation pour les géosciences, 6 rue Bastogne, 21850 Saint Apollinaire, France

³Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Centre de Meuse/Haute-Marne, RD 960, 55290, Bure, France

⁴Sorbonne Université and CNRS, UMR 7193, IStEP, F-75005, Paris, France.

La transition Oxfordien inférieur/moyen est marquée dans l'est du Bassin parisien par une reprise progressive de la sédimentation carbonatée, à l'image des bassins ouest-européens. En parallèle, des perturbations notables du cycle du carbone sont enregistrés au cours de cet intervalle (e.g. Louis-Schmidt et al., 2007 ; Dera et al., 2011 ; Carmeille et al., 2020). L'étude du forage Andra EST 433, situé à l'Est du Bassin parisien, a eu pour objectif de caractériser finement les variations géochimiques et minéralogiques de cette transition afin de comprendre 1) les mécanismes qui ont mené à la reprise et à la diversification des organismes producteurs de carbonates ; 2) la dynamique du cycle du carbone dans ce bassin. Les données faciologiques, minéralogiques et géochimiques suggèrent des effets diagénétiques locaux et limités sur le signal isotopique (C, O) des carbonates, ceux-ci s'exprimant notamment par des phénomènes de recristallisation et/ou d'épigenèse complexes. La tendance évolutive du

$\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ est conforme avec celle identifiée à plus basse résolution dans les autres bassins sédimentaires téthysiens et montre une excursion positive débutant à la transition *plicatilis*/Oxfordien moyen (*transversarium* ?). Cette augmentation est également visible par le signal isotopique du carbone de la MO ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$). En revanche un découplage est observé entre le signal isotopique organique et celui des carbonates dans les dépôts sus-jacents de l'Oxfordien moyen, où une nette excursion négative est enregistrée par le $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$. Cette excursion a également été observée dans plusieurs autres bassins mondiaux (e.g. Carmeille et al., 2020). Elle a été associée à des périodes d'accumulation de MO induites par des modifications des conditions de productivité en lien avec des modifications climatiques (aridité/humidité) et courantomiques (Louis-Schmidt et al., 2007 ; Carmeille et al., 2020). L'est du Bassin de Paris constitue ainsi une aire de comparaison pertinente avec les autres bassins du domaine téthysien, dans un contexte spécifique de reprise progressive de la production de carbonates et d'installation de la plateforme carbonatée de l'Oxfordien dans le Bassin de Paris, en lien avec les modifications paléogéographiques et paléoclimatiques à plus grande échelle du Jurassique supérieur.

Carmeille, M., et al. (2020). Global and Planetary Change

186:103127. Dera, G., et al. (2011). Geology 39:215–218.

Louis-Schmidt, B., et al. (2007). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 248:459–472.

Mots-Clés : Bassin de Paris, Oxfordien, cycle du carbone, production carbonatée



Volcanic activity of the Kerguelen Plateau and an associated climate change as triggering factors of the Kilian Event (OAE 1b; Late Aptian): New evidences from DSDP Site 545, offshore Morocco

Elodie Bracquart ¹, Guillaume Charbonnier ^{*1}, Sylvain Garel ^{2,3}, Julien Danzelle ¹,
Thomas Munier ¹

¹ Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP) – CNRS : UMR7193, Sorbonne Université, Paris – France

² Energy & Geoscience Institute, The University of Utah, Salt Lake City, UT 84108, USA

³ CVA engineering, Immeuble Toki Lana 7, chemin de la Marouette, Bayonne, France

The Aptian-Albian boundary is marked by perturbations of the carbon cycle and of the oxygenation conditions in the Western Tethys and in the Central Atlantic, corresponding to the Oceanic Anoxic Event 1b (OAE 1b). It is characterised by the presence, in the sedimentary record, of four dark organic-carbon-rich layers, including the Niveau Kilian at the latest Aptian. Even though this event is commonly attributed to the activity of the Kerguelen Igneous Province, the triggering mechanisms of the Kilian event and the conditions of deposition of the organic rich shales are still uncertain.

To answer these questions, a multi-proxy study (Clay mineral, mercury analysis, Rock-Eval) was carried out on core samples from DSDP Site 545, located in the deep domain of the Atlantic margin of Morocco. Rock-Eval pyrolysis analysis coupled with published trace- element data indicate that the increased organic matter burial at that site was both influenced by a boosted surface primary productivity and by an higher supply of terrestrial organic matter.

The good correlation between Hg concentrations and the Hg over total organic carbon (Hg/TOC) ratio indicates that the mercury sequestration in sediment was not controlled by the organic matter alone. We suggest that the subaerial volcanic activity of the southern Kerguelen plateau contributes to increase aerial flux of Hg into the stratosphere allowing its global distribution.

The clay mineral assemblages indicate an enhancement of the continental weathering before the Kilian Event synchronous with the appearance of volcanic pulses. We suggest that a global CO₂ increase generated a rapid warming and an accelerated hydrological cycle inducing the formation of a sapropel event. Finally, an aridification observed right after the Kilian Event, also identified in South-European and North-American locations suggests that this event had a major impact on the migration of the climate belts.

Keywords: Kilian event, OAE 1b, Mercury, Clay mineralogy, Volcanism, Cretaceous



L'adaptation physiologique des Angiospermes à la baisse du CO₂ au cours du Crétacé : une approche de modélisation basée sur les traits foliaires

Julia Bres*, Pierre Sepulchre, Nicolas Viovy, Nicolas Vuichard

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE/IPSL, CEA-CNRS-UVSQ,
Université Paris-Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France.

Au cours du Crétacé, la radiation des Angiospermes s'est accompagnée d'une révolution physiologique caractérisée dans le registre fossile par une augmentation de la densité de nervures de leurs feuilles et, in fine, de leur conductance stomatique. Il reste néanmoins complexe de (i) simuler l'évolution des traits foliaires, (ii) quantifier l'impact de ces changements sur la productivité et la transpiration des plantes, et (iii) identifier ses rétroactions sur le climat, dans le contexte paléogéographique et climatique particulier du Crétacé. Nous abordons ce triple problème en combinant la reconstruction de « paléo-traites » physiologiques, à partir du registre fossile et d'un modèle écophysologique, avec un modèle couplé atmosphère-végétation qui permet l'interaction entre la conductance stomatique et l'assimilation du carbone. Nous construisons et évaluons trois paramétrisations de la végétation rendant compte de l'augmentation de la conductance stomatique lors de la radiation des Angiospermes, de façon cohérente avec le registre fossile. Cette augmentation est simulée en altérant les capacités hydrauliques et photosynthétiques des plantes, soit de façon indépendante, soit de façon couplée. Ces expériences de sensibilité, combinées à deux scénarios extrêmes de teneur en CO₂ atmosphérique, montrent qu'une augmentation systématique de la transpiration est simulée lors du passage de la végétation d'un état pré-radiation des Angiospermes à un état post-radiation des Angiospermes, et que son amplitude est liée à la productivité primaire, modulée par la lumière, le stress hydrique et la demande évaporative. Une forte teneur en CO₂ typique du Crétacé favorise la productivité, la transpiration et l'efficacité d'utilisation de l'eau. Nos résultats suggèrent que la chute du CO₂ atmosphérique au cours du Crétacé a favorisé les plantes avec de fortes capacités hydrauliques et photosynthétiques, associées à des feuilles dont la densité de nervures a fortement augmenté.

Mots-Clés : Crétacé, Angiospermes, photosynthèse, transpiration, paléoclimat.



Effect of intense weathering and post-depositional degradation of organic matter on Hg sequestration in organic-rich sediments and its implications for deep-time investigations.

Guillaume Charbonnier ^{*1, 2}, Thierry Adatte ¹, Karl B. Föllmi ¹, Guillaume Suan ³

1 Institute of Earth Sciences, Géopolis, University of Lausanne, CH-1015 Lausanne, Switzerland 2 Sorbonne Université, Institut des Sciences de la Terre Paris, UMR 7193, F-75005 Paris, France 3 Université de Lyon, UCBL, ENSL, CNRS, LGL-TPE, 69622 Villeurbanne, France

Mercury (Hg) enrichments in sediments are increasingly used as a tracer for distal volcanism in time-time investigations. The impact of changes in organic-matter deposition and preservation on sedimentary Hg sequestration is, however, poorly understood. In this study, we evaluate the potential role of intense weathering and post-depositional organic-matter degradation on the sequestration of Hg in sediments. For this we investigate weathering profiles in organic-rich sediments from lowermost Toarcian sediments (T-OAE) exposed at the Lafarge cement quarry (Beaujolais, SE France) and organic-rich deposits, which compose the uppermost Cenomanian-lowermost Turonian Bonarelli level (OAE2) exposed at Furlo (Umbria-Marche Basin, Italy), Manilva (Betic Cordillera, Spain), Monte Velo (Trento Platform, Italy), and El Chorro (Betic Cordillera, Spain). The comparison of Hg data along a weathering profile in lowermost Toarcian sediments indicates that recent intense oxidation of the originally organic-rich deposits has removed up to 89% of the Hg signal originally contained in the non-weathered organic-rich succession. The organic-rich sediments of the Furlo and Manilva sections (Bonarelli level) are characterized by lower Hg/total organic carbon (TOC) ratios relative to the corresponding Hg contents, which suggest important Hg scavenging by organic matter (OM) deposition. At the opposite, in equivalent successions, three significant positive Hg/TOC excursions persist at El Chorro and Monte Velo (Bonarelli level equivalent). There, the samples with low to moderate TOC contents (from 0.04 to 1.96 wt. %) exhibit low HI values in the field of type-III OM. This resulted from post-depositional degradation of marine OM type II to type III, which has largely modified the amount and the quality of OM but not the Hg content. Consequently, the recorded Hg/TOC ratios do not reflect original Hg drawdown but post-depositional oxidation, suggesting that extreme care is needed in the evaluation of the history of organic matter preservation when using Hg as a tracer of volcanic activity through geological history.

Keywords: mercury, lowermost Toarcian, Cenomanian-Turonian boundary, weathering profiles, organic-matter degradation



The early Cretaceous environmental changes linked to the emplacement of large igneous provinces activity? Mercury data from the early Aptian sediments

Guillaume Charbonnier ^{*1, 2}, Thierry Adatte ¹, Jorge E. Spangenberg ³, Karl B. Föllmi ¹

1 Institute of Earth Sciences, Géopolis, University of Lausanne, CH-1015 Lausanne, Switzerland. 2 Sorbonne Université, Institut des Sciences de la Terre Paris, UMR 7193, F-75005 Paris, France.

3 Institute of Earth Surface Dynamics, University of Lausanne, Géopolis, CH-1015 Lausanne, Switzerland.

The Early Cretaceous period is punctuated by shorter episodes of considerable palaeoceanographic and palaeoenvironmental change. Intense volcanic activity related to the emplacement of large igneous provinces (LIPs) is considered as an important trigger of oceanic anoxic events (OAEs) and related major environmental change. The establishment of exact temporal relationships between OAE-induced environmental perturbations dated by bio- and chemostratigraphy on one hand and phases of intensified volcanic activity dated by radiometric means on the other hand remains, however, a major challenge. The various stratigraphic time scales currently used have rather confused and smeared the stratigraphic signal, affecting correlations between OAE's, other episodes of environmental and evolutionary change, and LIP activity. The recent development of mercury (Hg) as a proxy of distal volcanic activity offers the possibility to investigate potential relationships between environmental perturbations and LIP activity in detail. Here we report the distribution of mercury contents in reference sections in different basins during the Early Aptian (oceanic anoxic event 1a) episode to better understand the role of LIPs during the Early Cretaceous period. It appears that the interval equivalent to the OAE1a is marked by significant increases in Hg contents. The persistence of the anomaly in the Hg/TOC ratios in all sediments suggest that the Hg anomalies are not only related to primary productivity, redox conditions, and organic matter preservation, but has deeper roots. Volcanic outgassing related to the greater Ontong Java LIPs activity are taken here as the main source of the mercury enrichments observed during the Early Aptian sediments. Our data indicate that magmatic pulses at the onset of the OAE1a triggered the early Aptian environmental perturbations.

Keywords: Early Aptian; organic matter; mercury; volcanic activity.





Lower Aptian climate and recording of the oceanic anoxic event 1a on the terrigenous shelf of the Paris Basin.

Jean-François Deconinck^{1*}, Danny Boué¹, Francis Amédéo^{1,2}, François Baudin³, Ludovic Bruneau¹, Emilia Huret⁴, Philippe Landrein⁴, Jean-David Moreau¹ & Anne Lise Santoni¹

¹ Biogéosciences, UMR 6282, uB/CNRS, Université de Bourgogne Franche-Comté, France.

² 26 rue de Nottingham, 62100 Calais, France.

³ ISTE, UMR 7193, SU/CNRS, Sorbonne Université, France.

⁴ Agence Nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Centre de Meuse/Haute-Marne, France.

To the east of the Paris Basin, several boreholes were drilled in 2013 by Andra to better characterize Albien and Aptian clayey formations including the “Argiles à Plicatules” dated from the Lower Aptian. One of these borehole (AUB 121) crosses the “Argiles à Plicatules” with an excellent recovery allowing detailed biostratigraphy (ammonites), sedimentology, clay mineralogy, isotope geochemistry ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) and Rock-Eval analyses to be performed. Potentially, this formation encompasses the Oceanic Anoxic Event 1a (OAE1a) which has never been so far identified in the Paris Basin.

In AUB 121 borehole, the “Argiles à Plicatules” consists of a 30 m-thick homogeneous faintly bioturbated khaki clays and silty clays deposited in lower offshore environments except near the base where occasional bivalve shells accumulations are interpreted as storm deposits characterizing shallower upper offshore environments. The occurrence of some ammonites permits to draw a biostratigraphic scheme notably the recognition of the *deshayesi* and the *furcata* Zones.

The clay mineral assemblages are dominantly composed of illite and kaolinite associated with minor amounts of chlorite, vermiculite and smectite. $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ values range generally between -24 and -25‰ except in a particular interval located in the lower part of the *deshayesi* Zone characterized by a prominent negative excursion of about -2.5‰ to -3‰, where the C2-C4 isotopic segments preceding the OAE1a can be easily recognized. Surprisingly the interval corresponding to the OAE1a is not significantly enriched in organic matter. However, the $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ negative excursion allows the OAE1a to be identified in the Paris Basin where bottom water anoxic conditions were likely insufficiently marked to preserve OM, what could be linked to a low productivity in semi-restricted conditions.

Finally, the C2 to C5 isotopic segments are characterized by the abundance of kaolinite and the absence of smectite suggesting an acceleration of the hydrological cycle and enhanced runoff and/or hydrolyzing conditions over the emerged landmasses just before and during the onset of OAE1a.

Keywords : Aptian, Argiles à Plicatules, Clay minerals, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, OAE1a



Evidence for repeated and global palaeoenvironmental perturbations during the Aalenian

Alicia Fantasia^{1,2*}, Emanuela Mattioli^{1,3}, Jorge E. Spangenberg⁴, Thierry Adatte⁵, Enrique Bernárdez⁶, Jorge Ferreira¹, Nicolas Thibault⁷, François-Nicolas Krencker², Stéphane Bodin²

¹ Univ Lyon, Univ Lyon 1, ENSL, CNRS, LGL-TPE, F-69622 Villeurbanne, France ² Department of Geoscience, Aarhus University, 8000 Aarhus C – Denmark

³ Institut Universitaire de France (IUF), Paris Cedex 05, France

⁴ Institute of Earth Surface Dynamics, University of Lausanne, 1015 Lausanne – Switzerland ⁵ Institute of Earth Sciences, University of Lausanne, 1015 Lausanne – Switzerland

⁶ Instituto Superior de Correlación Geológica, Miguel Lillo 205 (CP 4000), San Miguel de Tucumán, Argentina

⁷ Department of Geosciences and Natural Resource Management, University of Copenhagen, 1350 Copenhagen K – Denmark

The Jurassic was punctuated by several episodes of abrupt environmental changes associated with climatic instabilities, severe biotic crisis, and perturbations of the global carbon cycle. Over the last decades, the Toarcian Oceanic Anoxic Event and the early Bajocian Event have attracted much attention because they represent such episodes of global and severe environmental changes. Bracketed in between the Toarcian and the Bajocian, the Aalenian stage (Middle Jurassic, ~174–170 Ma) has been overlooked, although there is evidence from Tethyan and Boreal sites that it was a time of environmental changes marked by carbon cycle perturbations associated with marine biotic turnovers. Hence, there is certainly important knowledge to gain from the Aalenian in order to better understand the wider context of the Toarcian and Bajocian events.

In this study, we provide high-resolution, biostratigraphically well-defined carbon isotope records ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$) combined to Rock-Eval data for the upper Toarcian–lower Bajocian interval of two expanded marl/limestone alternation successions from France (French Subalpine Basin) and Chile (Andean Basin). The comparison with available records from the Tethyan and Boreal domains highlights that medium-term $\delta^{13}\text{C}$ fluctuations are reproducible across different palaeoceanographic settings from both hemispheres and between different carbon substrates. This study provides one of the most expanded high-resolution chemostratigraphic records for the entire Aalenian stage, and shows compelling evidence from both hemispheres that it was a time marked by recurrent medium-term global carbon cycle perturbations. Combined with a review of geological events, climate modes, abundance and diversity of major fossil groups, and trophic conditions inferred from the calcareous nannofossil record, our study shows that the middle–late Aalenian was a time of major palaeoenvironmental changes, biotic reorganization and carbon cycle perturbation. Indeed, this time interval records a prominent positive carbon isotope shift, the demise of platform carbonate factories associated to an increase in eutrophic calcareous nannofossils, which likely indicate an increase in seawater fertility. This middle–late Aalenian Event certainly represents a precursor episode of the early Bajocian carbonate crisis, and might have been triggered by major tectonic rearrangement and volcanic activity.

Mots-Clés : carbon isotope stratigraphy, recurrent carbon cycle perturbations, biotic events, Middle Jurassic



Climat en Arctique du Paléocène à l'Eocène supérieur (58-40 Ma) d'après les pollens du site IODP 302 (ACEX)

Séverine Fauquette ^{*1}, Jean-Pierre Suc ², Speranta-Maria Popescu ³, Cécile Robin ⁴

¹ Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier, Université de Montpellier, CNRS, IRD, EPHE, France

² Institut des Sciences de la Terre de Paris, Sorbonne Université, CNRS-INSU, France

³ Geobiostratdata.consulting, Rillieux la Pape, France

⁴ Géosciences Rennes, Université de Rennes, CNRS, France

Les forages IODP 302, réalisés au centre de l'Océan Arctique près de la ride de Lomonosov, bénéficient d'un cadre bio-chrono-stratigraphique de la fin du Paléocène à l'Eocène moyen- supérieur (Backman *et al.*, 2006). Malgré la multiplicité des analyses (sédimentologie, géochimie, micropaléontologie) menées sur ces archives sédimentaires, une seule étude concerne le pollen, concentrée sur la base du forage M0004 (*PETM – ETM2*) et proposant des valeurs paléoclimatiques biaisées par la faiblesse des identifications botaniques des grains de pollen (Willard *et al.*, 2019).

Dans notre étude soutenue financièrement par IODP-France, nous avons analysé le contenu pollinique des forages M0004 et M0002. L'abondance des pollens, leur excellent état de préservation ainsi que la diversité végétale élevée (plus de 100 taxons identifiés) témoignent du voisinage très proche de terres émergées de la marge sibérienne. L'identification botanique rigoureuse du pollen permet des reconstitutions robustes de la végétation et du paléoclimat. L'environnement était forestier, dominé alternativement par *Glyptostrobus* ou *Castanopsis-Lithocarpus*. Le diagramme pollinique est directement corrélable avec la courbe de $\delta^{18}\text{O}$ de référence (Cramer *et al.*, 2009). Les maxima thermiques sont exprimés par des pourcentages de plantes subtropicales avec la présence parfois importante de plantes tropicales. L'élément de mangrove, *Avicennia* (que nous avons signalé dans l'Eocène inférieur de l'île sibérienne de Faddeevsky et du Delta de Mackenzie, Suan *et al.*, 2017 ; Salpin *et al.*, 2019), signe chaque maximum thermique, du *PETM* au *MECO*, avec des valeurs de la température moyenne annuelle élevées, comprises entre 18 et 22°C, des températures du mois le plus chaud pouvant atteindre une moyenne de 27°C et du mois le plus froid ne descendant pas au-dessous de 10°C. Les précipitations annuelles allaient de 1200 à 1400 mm. Cette étude révèle en outre l'impact qu'une longue période très chaude peut avoir sur les plus hautes latitudes du globe et sur l'expansion de la végétation thermophile.

Backman *et al.*, 2006. *IODP Proc.* 302.

Cramer *et al.*, 2009. *Paleoceanography*, 24,

PA4216. Salpin *et al.*, 2019. *GSA Spec. Paper* 541, 27.

Suan *et al.*, 2017. *Geology*, 45, 539-542.

Willard *et al.*, 2019. *Global and Planetary Change*, 178, 139-152.

Mots-Clés : Paléoclimat, Arctique, IODP 302, Palynologie, Paléocène, Eocène inférieur, Maxima thermiques



Biogeochemical disruptions across the Cretaceous-Paleogene boundary: insights from sulfur isotopes

Arbia Jouini ^{1*}, Guillaume Paris ¹, Guillaume Caro ¹, Annachiara Bartolini ², Silvia Gardin ²

¹ Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, CRPG-CNRS, UMR7358, 15 rue Notre Dame des Pauvres, BP20, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy, France, email: Arbia.jouini@univ-lorraine.fr

² Muséum National D'Histoire Naturelle, Département Origines & Evolution, CR2P MNHN, CNRS, Sorbonne Université, 8 rue Buffon CP38, 75005 Paris, France

The Cretaceous–Paleogene (KPg) mass extinction event 66 million years ago witnessed one of the ‘Big Five’ mass extinctions of the Phanerozoic. Compositional changes of the ocean–atmosphere system triggered by the impact and/or volcanic massive sulfuric acid inputs likely played a key role in this extinction. Understanding the coeval sulfur biogeochemical cycle may thus help constrain some complex environmental changes that culminated in the KPg mass extinction, including oceanic biogenic carbonate crisis and changes of sea water chemistry and ocean oxygen level.

Here we present the first stratigraphic high resolution isotopic record of carbonate associated sulfate (CAS) based on monospecific planktic and benthic foraminifer samples during the Maastrichtian–Danian transition from IODP Pacific site 1209C. Preliminary $\delta^{34}\text{SCAS}$ data reveals a major perturbation of the sulfur cycle around the KPg transition with rapid fluctuations (100–200 kyr) of about 2–4‰ ($\pm 0.54\text{‰}$, 2SD) during the late Maastrichtian followed by a negative excursion in $\delta^{34}\text{SCAS}$ of 2–3‰ during the early Paleocene.

An increase in oxygen levels, associated with a decline in organic carbon burial related to a collapse in primary productivity, may have led to the early Paleocene $\delta^{34}\text{SCAS}$ negative shift via a significant drop in microbial sulfate reduction. Alternatively, Deccan volcanism could also have impacted the sulfur cycle via direct input of isotopically light sulfur to the ocean. A revised correlation between $\delta^{34}\text{SCAS}$ data reported in this study and precise geochronological constraints on the Deccan volcanism phases would allow us to explore this hypothesis.

Keywords: KPg crisis, Sulphur cycle, Planktic and benthic foraminifera



Planktonic foraminiferal and geochemical record across the Cretaceous-Paleogene boundary (K-Pg): evidence from the Neo-Tethys, Turkey

A. Uygur Karabeyoglu ^{*1}, Thierry Adatte ¹, Jorge Spangenberg ², Sevinç Özkan-Altiner ³, Demir Altiner ³, Valentin Lorenzo ¹

¹ISTE, Institute of Earth Sciences, Université de Lausanne, Lausanne - Switzerland

²IDYST, Institute of Surface Dynamics, Université de Lausanne, Lausanne - Switzerland

³Department of Geological Engineering, Middle East Technical University, Ankara - Turkey

The end-Cretaceous mass extinction is a unique event such that it potentially coincides with both the Chicxulub bolide impact and the Deccan volcanism. Among these two drivers, the role of the Deccan volcanism is crucial to decipher if there is a causal relationship between volcanism and environmental stress, and if so, how stressed the environment was during the latest Maastrichtian. To assess the cause-and-effect relationship between Deccan volcanism and climate change and mass extinctions, high-resolution biostratigraphy, quantitative species analysis coupled with geochemical measurements have been performed on complete sections of Mudurnu-Göynük and Haymana basins (Turkey).

Detailed quantitative study on planktonic foraminifera of the Haymana Basin revealed that planktonic foraminiferal community in the latest Maastrichtian is dominated by ecological generalists with small, simple morphologies (e.g., *Heterohelix*, *Globigerinelloides*, *Guembelitra*). Among them low oxygen tolerant *Heterohelix globulosa* is the most dominant taxa and their abundance changing with the presence of stress marker *Guembelitra cretacea*. In all sections, the K/Pg boundary itself is characterized by 2-3 mm thick reddish oxidized layer which corresponds to sudden annihilation of large, ornamented ecological specialists (e.g., *Globotruncana*, *Rugoglobigerina*, *Racemiguembelina*). Right after the boundary, there is an acme of calcareous dinoflagellate cysts (*Thoracosphaera*) and a surge of *Guembelitra cretacea* indicate ecosystem collapse in post-K/Pg environment.

On the other hand, detailed quantitative analysis shows a systematic reduction in the species richness throughout the *Plummerita hantkeninoides* Zone corresponding to the final 150 kyr of the Cretaceous. Proliferations of the *Guembelitra cretacea* through late Maastrichtian is known as an indicator of high terrigenous influx; therefore, enhanced food resources. The high sedimentation rates observed in all the studied sections might be linked to increased greenhouse conditions due to Deccan volcanism leading to enhanced weathering. Overall, our multiproxy approach including quantitative biostratigraphy and geochemical analyses highlights the influence of the Deccan volcanism by releasing high amounts of atmospheric CO₂ and SO₂, leading to the climatic changes and associated biotic stress, which predisposed faunas to eventual extinction at the K/Pg boundary.

Keywords: Mass Extinction, K-Pg boundary, Planktonic Foraminifera, Paleocology, Deccan Volcanism, Turkey



La géochimie des coccolithes, outil atypique pour la reconstruction paléoclimatique du Pliocène.

Goulwen Le Guevel* ¹, Fabrice Minoletti ¹, Michael Hermoso ²

¹ Sorbonne Université, Institut des Sciences de la Terre de Paris (UMR 7193 IStEP) - France

² Université du Littoral Côte d'Opale, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (UMR 8187 LOG) - France

Le Pliocène (5,33 – 2,58Ma) est une des périodes cibles de référence pour les travaux du GIEC visant à anticiper les modalités et les effets du changement climatique actuel. En effet, cette période du Cénozoïque présente une distribution des masses continentales très proche de l'actuel et les conditions climatiques sont similaires à celles prédites par les modèles numériques du climat pour le futur proche (températures océaniques de surface – SSTs – supérieures de 3°C à celles actuelles et pression de CO₂ atmosphériques comprises entre 1 et 2 fois la valeur préindustrielle).

Alors que les principaux paramètres du système climatique sont souvent déterminés à partir de marqueurs indépendants les uns des autres, cette étude consiste à déterminer de manière combinée les *pCO₂* et les SSTs à partir d'une archive unique, les coccolithes. Ce sont des biominéraux calcitiques produits par les coccolithophoridés, des microorganismes photosynthétiques. Ils constituent une archive sédimentaire de grande qualité puisqu'ils sont formés dans les eaux océaniques les plus superficielles et enregistrent donc les paramètres physico-chimiques de l'interface océan – atmosphère qui sont nécessaires au paramétrage des modèles climatiques.

Après l'isolement des coccolithes en fractions purifiées, l'évaluation des SSTs est basée sur le rapport isotopique de l'oxygène corrigée des fractionnements isotopiques biologiques, déterminés par des expériences de culture de coccolithophores en laboratoire. Les *pCO₂* sont évaluées par le différentiel isotopique en carbone mesuré sur la calcite des coccolithes qui résulte d'une limitation différentielle en CO₂ entre des coccolithophores de tailles différentes. Ces effets vitaux différentiels en carbone sont proportionnels aux teneurs en CO₂ aq et donc aux *pCO₂* atmosphériques.

Les résultats obtenus sur l'atlantique sud (site 516, Rio Grand Rise, 30°S) et la mer des Caraïbes (site 999, Kogi Rise, 13°N) sont en bon accord avec ceux déterminés sur les alcénones (Seki 2010, Badger 2013) et par le Mg/Ca (Karas 2017). Les SSTs et les *pCO₂* sont relativement constantes sur tout l'intervalle étudié (5,5 – 2Ma). Les *pCO₂* sont entre 1 et 1,5 fois les valeurs préindustrielles.

Mots-Clés : Coccolithes, SST, *pCO₂*, Pliocène

*Intervenant





Constraints on mid-Cretaceous ocean circulation from neodymium isotope modelling

Jean-Baptiste Ladant^{1,*}, Hadrien Nauroy¹, Marie Laugie², Frédéric Fluteau³, Jean-Claude Dutay¹ and Pierre Sepulchre¹

¹LSCE – France

²CEREGE – France

³IPGP – France

Understanding the extreme carbon cycle perturbation of the mid-Cretaceous (OAE2, ~94 Ma) requires constraints on the modes of ocean circulation during this interval because the extension of anoxic seafloor is largely contingent on the pathways of water masses. In this contribution we model the neodymium isotopic composition of seawater (expressed as ϵ_{Nd}) in a state-of-the-art offline ocean model with the approximation that the marine ϵ_{Nd} composition is primarily driven by boundary exchange with continental margins. The offline ocean model is forced by an ensemble of earth system model simulations of the mid-Cretaceous with different paleobathymetric reconstructions of the Central American Seaway and of some South Atlantic submarine ridges. Results will be confronted to published estimates of mid-Cretaceous marine ϵ_{Nd} to tentatively provide new constraints on plausible modes of mid-Cretaceous ocean circulation.

Mots-Clés : modelling ; ocean circulation ; neodymium isotopes



Assessing the potential of brachiopod shell geochemistry as a recorder of past sea-water temperatures and oxygen isotope composition.

Thomas Letulle^{*1}, Danièle Gaspard², Mathieu Daëron³, Guillaume Suan¹, Arnaud Vinçon-Laugier¹, Florent Arnaud-Godet¹, Christophe Lécuyer¹.

¹ Laboratoire de Géologie de Lyon, CNRS UMR 5276, Univ Lyon, Univ Lyon 1, ENS Lyon - France

² Centre de Recherches sur la Paléobiodiversité & les Paléoenvironnements (CR2P), UMR 7207, Sorbonne Universités, CNRS - Muséum National d'Histoire Naturelle – UPMC Paris 6 – France

³ Paris-Saclay - France

Most of our knowledge of past ocean temperature history is based on the $\delta^{18}\text{O}$ measurements of calcium carbonate fossil shells. However, the determination of past temperature using this proxy requires the knowledge of past ocean $\delta^{18}\text{O}$, which is generally poorly constrained. Other carbonate-based paleothermometers, such as Mg/Ca ratios, and clumped isotopes ($\Delta 47$), have hence been developed to estimate independently paleotemperatures, and to calculate past ocean $\delta^{18}\text{O}$ using various groups of calcifying organisms. Articulated brachiopods are some of the most commonly used in studies of past oceans geochemistry and temperature. They are abundant in the fossil record since the Cambrian, and their low Mg-calcite shell is relatively resistant to diagenetic alteration. Here we investigate the potential of brachiopod shells as recorders of growing temperature and sea-water $\delta^{18}\text{O}$ via multiple carbonate based paleothermometers.

Modern articulated brachiopod shells from different locations were analyzed for their stable isotopes composition ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$), $\Delta 47$ and Mg/Ca ratios. They cover a wide range of temperatures (-1.8 to 25.5°C), depths (5 to 3431m) and salinities (33.4 to 37.0 PSU). A broad sampling was performed so that the different analyses can be achieved on the same sampled powder, but care was taken to avoid shell areas that are considered in chemical disequilibrium with sea-water. Our results and the calculated $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ allow us to propose a revised oxygen fractionation equation between sea-water and modern brachiopod shell calcite:

$$1000\ln\alpha(\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}) = -4.99T + 169.57 \quad R^2 = 0.95$$

Where $\alpha(\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O})$ is the oxygen fractionation factor, T is in $^\circ\text{C}$. Measured $\Delta 47$ imply growing temperatures that are in excellent agreement with those estimated from oceanographic data. This supports the use of clumped isotopes as an alternative temperature proxy which can be used with $\delta^{18}\text{O}$ to estimate past $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ with a precision of about 1‰ VSMOW. The application of Mg/Ca paleothermometry to brachiopod shells will also be discussed. Our results will be compared to published relationships between brachiopod shell geochemistry and growing temperature. Such multi-proxy studies of modern brachiopod shell geochemistry are critical for studying the fossil record and resolve challenging questions regarding the Phanerozoic climate record.

Keywords: Paleotemperature, Brachiopod calcite, Sea-water $\delta^{18}\text{O}$, Clumped isotopes



Orbital control of the anoxic events in the Hauterivian and Barremian stages

Mathieu Martinez^{1*}, Roque Aguado², Miguel Company³, Jose Sandoval³,
Luis O'Dogherty⁴

1 : Géosciences Rennes – CNRS : UMR 6118, Univ Rennes – France

2 : Departamento de Geología y CEA-Tierra, Universidad de Jaén – Spain

3 : Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Universidad de Granada

– Spain
4 : Departamento Ciencias de la Tierra, Universidad de Cádiz – Spain

Episodes of Environmental Changes (EECs) correspond to reinforced greenhouse conditions associated to modifications of the carbon cycle that punctuated the Early Cretaceous. From the latest Hauterivian to the Barremian, three EECs occurred (the Faraoni, Mid-Barremian and Taxy events). Despite the $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ shows various trends during these events, they are all associated to short-lived geographic expansion of organic-rich deposits in the western Tethys. We propose here an astronomical calibration of the latest Hauterivian-earliest Aptian from the Subbetic Domain (SE Spain) to better constrain the pacing of these events and understand their forcing mechanisms. The sedimentary series studied are composed of orbitally-forced hemipelagic marl-limestone alternations. Magnetic susceptibility was measured every 7 cm using a Kappabridge KLY-3. Spectral analyses revealed the pervasive presence of the eccentricity cycles. Interpretations are notably validated by lithostratigraphic and biostratigraphic correlations between the sections. The duration of the Barremian Stage is calculated at 4.25 ± 0.17 Ma. Anchoring this duration to recently published radio-astrochronological time scales, the base of the Barremian Stage is dated at 125.91 ± 0.06 Ma and the top of the Barremian Stage at 121.67 ± 0.16 Ma. The EECs of the latest Hauterivian and Barremian stages show a pacing of 2.34 Myr, suggesting a control of the long eccentricity cycle on the expansion of oceanic anoxic conditions in the Tethys through changes in humid/arid cycle, weathering, sea level and fertilization of the sea surface.

Mots-Clés : Early Cretaceous, oceanic anoxic events, Episodes of Environmental Changes, carbon cycle, orbital forcing, eccentricity



Evolution des cortèges argileux de l'Albien au Santonien (113-84 Ma) au large des côtes sud-ouest australiennes au cours : Données préliminaires et origine(s) possible(s) des argiles

Thomas Munier*, Armand Metgalchi, Laurent Riquier, François Baudin, Omar Boudouma

Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP) – UMR 7193 Sorbonne Université/CNRS – France

Le Crétacé est une période chaude, de type *greenhouse*, marquée par une forte océanisation et le développement de plusieurs provinces magmatiques au cours de l'intervalle Albien- Santonien (113-84 Ma). Cette intense activité volcanique a conduit au relargage de CO₂ et à la hausse des températures jusqu'à un maximum thermique enregistré à la limite Cénomanien/Turonien (~94 Ma). Cet intervalle est bien contraint au niveau de l'Océan Atlantique mais a été peu étudié au sein des océans Indien et Austral.

Afin de mieux préciser l'évolution des conditions d'altération et les changements climatiques dans ces deux océans, l'étude des assemblages argileux de l'Albien au Santonien a été réalisée sur deux nouveaux forages IODP issue de l'expédition 369 : le site U1512, situé dans la Grande Baie australienne (S. Australie), et le site U1513, situé dans le Bassin Mentelle (SW Australie).

Le site U1513 présente des assemblages dominés par les smectites (75 à 98%), où persistent quelques illites (< 3%) de l'Albien au Coniacien (113-86 Ma). Les kaolinites (0 à 25%), abondantes à l'Albien, disparaissent au début du Turonien lors du maximum thermique. L'analyse minéralogique du site U1512 a révélé des assemblages peu variés du Turonien au Santonien (94-84 Ma). Les smectites dominent (80 à 95%) tandis que les kaolinites (< 12%) et les illites (< 10%) sont présentes de manière notables que ponctuellement. Des observations au MEB n'ont pas permis de mettre évidence la présence des formes authigènes de ces minéraux.

Ces assemblages communs au Crétacé semblent témoigner, par la faible présence de minéraux argileux primaires (chlorite et illite), de conditions d'hydrolyse fortes à modérées aux hautes latitudes. La domination des smectites pourrait néanmoins indiquer de mauvaises conditions de drainage associées au haut niveau marin du Turonien et ainsi masquer l'intensité de l'hydrolyse sur les côtes sud et ouest australiennes.

Mots-Clés : argiles, Albien-Santonien, altération, paléoclimat, Exp IODP 369.



Evolution climatique au Jurassique inférieur (Sinémurien supérieur) de la zone Nord-Ouest européenne, déduit de la minéralogie des argiles et des isotopes du carbone

Thomas Munier ^{1,2*}, Jean-François Deconinck ¹, Pierre Pellenard ¹, Stephen P. Hesselbo ³, James B. Riding ⁴, Clemens V. Ullmann ³, Cédric Bougeault ¹, Mathilde Mercuzot ⁵, Anne-Lise Santoni ¹, Emilia Huret ⁶, Philippe Landrein ⁶

¹ Biogésosciences – UMR 6282 Université de Bourgogne Franche-Comté/CNRS/EPHE – France

² Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP) – UMR 7193 Sorbonne Université/CNRS – France

³ Camborne School of Mines and the Environment and Sustainability Institute – University of Exeter – Angleterre

⁴ British Geological Survey – Angleterre

⁵ Géosciences Rennes – UMR 6118 Université de Rennes 1/CNRS – France

⁶ Agence Nationale pour la gestion des déchets radioactifs – France

L'étude des minéraux argileux et des isotopes stables (carbone) du Sinémurien supérieur du bassin de Cardigan Bay (forage de Mochras, Pays de Galles) et du bassin de Paris (forage de Montcornet, France) permet de mettre en évidence les conditions environnementales et climatiques dominantes à cette période. Dans les deux bassins, situés à des paléolatitudes proches (30 à 35°N), les assemblages de minéraux argileux comprennent des chlorites, des illites, des interstratifiés illite-smectite (IS R1), des smectites et des kaolinites dans des proportions variables. L'influence de la diagenèse d'enfouissement et de l'authigénèse étant négligeable dans les deux forages, les minéraux argileux sont interprétés comme provenant principalement de l'érosion des massifs calédoniens et varisques. Dans le bassin de Cardigan Bay, les variations des proportions de smectites et de kaolinites sont opposées sur l'ensemble du Sinémurien supérieur et révèlent des intervalles d'hydrolyse intense sous un climat chaud et régulièrement humide (fortes proportions de kaolinites) et des intervalles semi-arides (fortes proportions de smectites). Les kaolinites, particulièrement abondantes dans la partie supérieure de la Zone à *obtusum* et dans la Zone à *oxynotum*, suggèrent une hydrolyse plus intense probablement coïncidente avec des conditions chaudes, responsables d'une accélération du cycle hydrologique. Au nord du bassin de Paris, la série stratigraphique est beaucoup moins épaisse que sur le site du bassin de Cardigan Bay. Les assemblages argileux sont principalement composés d'illites et de kaolinites sans tendance significative, mais un intervalle riche en smectites identifié dans la Zone à *obtusum* est interprété comme une conséquence de l'émersion du Massif Londres-Brabant suite à un abaissement du niveau marin. La diminution à long terme du $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ à la fin de la Zone à *oxynotum*, enregistrée dans les deux sites, semble amorcer l'excursion négative reconnue quasi-mondialement au passage Sinémurien/Pliensbachien (SPBE) probablement liée au volcanisme de la Province Magmatique de l'Atlantique Central (CAMP).

Mots-Clés : argiles, Jurassique, Sinémurien, paléoclimat, isotopes du carbone

*Intervenant



Une réorganisation de la circulation océanique à l'origine de l'anoxie au cours de la glaciation de l'Ordovicien terminal

Alexandre Pohl^{*1,2}, Zunli Lu³, Wanyi Lu³, Richard G. Stockey⁴, Maya Elrick⁵, Menghan Li⁶, André Desrochers⁷, Yanan Shen⁶, Ruliang He³, Seth Finnegan⁸, Andy Ridgwell¹

¹Department of Earth Sciences, University of California, Riverside, CA, USA

²Biogéosciences, UMR 6282, UBFC/CNRS, Université Bourgogne Franche-Comté, Dijon, France

³Department of Earth Sciences, Syracuse University, Syracuse, NY, USA

⁴Department of Geological Sciences, Stanford University, Stanford, CA, USA

⁵Earth and Planetary Sciences, University of New Mexico, Albuquerque, NM, USA

⁶School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, China

⁷Earth and Environmental Sciences, University of Ottawa, Ottawa, Canada

⁸Department of Integrative Biology, University of California, Berkeley, Berkeley, CA, USA

Les proxies géochimiques suggèrent une étendue de l'anoxie océanique durant le maximum glaciaire de l'Ordovicien terminal. Ces résultats apportent une possible explication à la mise en place du second pic de l'extinction de masse de l'Ordovicien Supérieur. Néanmoins, la mise en place d'une anoxie océanique durant un refroidissement climatique global est en apparente contradiction avec le modèle de l'anoxie établi sur les périodes plus récentes et mieux documentées du Mésozoïque, qui associe généralement étendue de l'anoxie océanique avec réchauffement climatique. Cela remet en question la réalité de cette extension de l'anoxie au cours du pic glaciaire fini-ordovicien, et pose la question des mécanismes éventuellement impliqués.

Dans cette étude, nous produisons tout d'abord de nouvelles mesures du rapport iode/calcium (I/Ca). Ces résultats démontrent une oxygénation de l'océan peu profond durant la seconde phase de l'extinction fini-ordovicienne, tandis que l'océan profond deviendrait largement anoxique. Dans un second temps, nous réconcilions ces observations apparemment conflictuelles à l'aide d'un ensemble de simulations numériques Système- Terre réalisées avec le modèle cGENIE. A l'aide des contraintes fournies par les proxies de température et nos mesures I/Ca, nous identifions un scénario dans lequel le refroidissement de l'Ordovicien terminal induit à la fois une extension de l'anoxie des fonds marins et une oxygénation de l'océan peu profond. Dans le modèle, l'anoxie s'étend du fait d'une réorganisation de la circulation océanique, qui réduit la ventilation de l'océan profond.

Ces nouveaux résultats suggèrent qu'il n'existe donc pas de relation simple entre changements climatiques et oxygénation océanique. La comparaison des résultats du modèle et des nouvelles données I/Ca suggère par ailleurs que l'anoxie ne serait pas à l'origine du second pic de l'extinction de masse fini-ordovicienne.

Mots-Clés : Ordovicien, oxygénation océanique, modèle Système-Terre, proxy I/Ca



The marine geochemical record of the OAE 2 (~94 Ma) at high latitude: Example of the IODP Site U1516 (Exp. 369; Mentelle Basin, SW Australia)

Laurent Riquier^{1*}, Julien Danzelle¹, Matthew M. Jones ², Christophe Thomazo³,
François Baudin¹

1 – UMR 7193 IStEP, Sorbonne Université, France

2 – Earth & Environmental Sciences, University of Michigan, USA

3 – UMR 6282 Biogéosciences, Université de Bourgogne-Franche Comté, France

The Oceanic Anoxic Event 2 (or OAE2), recorded at the Cenomanian-Turonian boundary (CTB; ~94 Ma), is characterized in several oceanic domains by the deposition of black organic-rich levels, usually termed as *black shales*, and is detected globally by a positive $\delta^{13}\text{C}$ anomaly of around 3.5‰ in both organic and inorganic fractions. OAE2 has been particularly well studied in the Northern Hemisphere, as in the Central Atlantic Ocean or in Tethyan domain, where this event corresponds to the development of dysoxic to euxinic conditions, likely as a consequence of (1) an increase of nutrient inputs from volcanic activity or enhanced continental weathering and (2) partial restriction of water masses.

In contrast, the OAE2 is less well documented in the Southern Hemisphere, as in the Indian Ocean, where only few sites record the CTB. The impact on environmental parameters from this event is thus still debated in this area. Consequently, the nearly complete sedimentary sequence of the CTB obtained at Site U1516 during the IODP Expedition 369 in the Mentelle Basin (SW Australia) represents a unique opportunity to better understand the OAE2 in the Southern high latitudes.

For this site, the CTB is marked by a 3.5m thick carbonate-barren interval, encompassing 3 thin black levels with TOC values reaching up to 12.5%. New trace element data exhibit high concentrations of redox-sensitive elements (Mo, U, V) in these TOC-rich levels, highlighting dysoxic conditions in the Mentelle basin during OAE2. Conversely, elements linked to primary productivity (Si, P, Ba) show no noticeable enrichments above pre-OAE2 concentrations. Thus, elevated local primary productivity does not seem to be a triggering factor for the presence of black shales in this basin. Lastly, a sharp decrease in initial osmium isotope ratio (Os_i) within the carbonate barren interval is interpreted as an evidence for ocean acidification associated with large igneous province volcanism during OAE2.

Mots-Clés : OAE2, Indian Ocean, TOC, TME, Cretaceous



La prise en compte du méthane permet-elle de réduire le désaccord modèle-données dans les climats chauds du phanérozoïque ? Le cas du Pliocène.

Gilles Ramstein ^{*1}, Peter O. Hopcroft ², Thomas A.M. Pugh ^{2,3}, Stephen J. Hunter ⁴, Fabiola Murguía-Flores ⁵, Aurélien Quiquet ⁶, Yong Sun ^{1,6}, Ning Tan ^{1,7} and Paul J. Valdes ⁵.

¹ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE/IPSL - France.

² School of Geography, Earth & Environmental Sciences, University of Birmingham -U.K. ³ Birmingham Institute of Forest Research, University of Birmingham-U.K.

⁴ School of Earth and Environment, University of Leeds, Leeds – U. K.

⁵ Bristol Research Initiative for the Dynamic Global Environment, University of Bristol- U.K. ⁶ IAP, CAS, Beijing - Chine.

⁷ IGG, CAS, Beijing-Chine.

Depuis les simulations de Baron des années 1980 avec des modèles climatiques plus rudimentaires que ceux utilisés aujourd'hui, le défi de simuler pour les climats chauds un gradient méridien de température aussi aplati qu'observé dans les reconstructions demeure. En particulier, au Pliocène, mid-Miocène, Eocène et Crétacé moyen (Cenomanien), on constate une large sous-estimation des résultats de modèles par rapport aux reconstructions par divers proxies de température aux hautes latitudes. Le pliocène moyen (3Ma) est une période privilégiée, d'une part parce que la tectonique n'a pas bouleversé la paléogéographie hormis les ouvertures/fermeture de détroits, d'autre part, parce qu'on dispose de reconstructions relativement fiables de la teneur atmosphérique en CO₂ (pCO₂). C'est pourquoi un projet d'intercomparaison (PLIOMIP) s'est focalisé sur cette période. L'analyse des résultats de la première phase a confirmé ce désaccord, à la fois en domaine continental et marin. Cette première phase ne prenait pas en compte la fermeture des détroits dans l'hémisphère nord et le transport d'énergie par les océans, en particulier l'AMOC, n'était pas modifié. De plus, une valeur de pCO₂ de 405 ppm avait été choisie. Dans la seconde phase (PLIOMIP2), une paléogéographie plus réaliste a été choisie et de nombreux modèles ont exploré l'impact climatique de valeurs de pCO₂ de 350 à 450 ppm, sans pour autant parvenir à reproduire les données. Par contre, aucune simulation ne prenait en compte les variations de méthane dans l'atmosphère faute de proxy. La seule manière de contraindre cette valeur est le calcul des sources et des puits. En utilisant des simulations de ces deux phases de PLIOMIP, nous avons calculé les effets des processus d'émission et de transformation du méthane et montré une augmentation sensible de sa concentration, qui, une fois prise en compte, conduit à une élévation des températures à hautes latitudes et à un aplatissement du gradient méridien de températures.

Mots-Clés : Pliocène, méthane, amplification polaire



Palaeotemperature and latitudinal temperature gradient implications for the Late Jurassic of the Ouarsenis Mountains (north-western Algeria) based on stable isotope values of well-preserved belemnites

Radouane Sadji^{1,2}, Axel Munnecke², Miloud Benhamou¹, Matthias Alberti^{3,4}, Salim Belkhedim¹, Nabil Ramdane⁵

¹Laboratoire de Géodynamique des Bassins et Bilan Sédimentaire, Université Mohamed Ben Ahmed Oran 2, 1524 El M'naouer, 31000 Oran, Algeria

²GeoZentrum Nordbayern, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Loewenichstraße 28, 91054 Erlangen, Germany

³Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Ludewig-Meyn-Straße 10, 24118 Kiel, Germany

⁴School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

⁵Independent researcher ; Ouled Amar, Stidia, Mostaganem, 27023, Algeria

The Late Jurassic is considered as greenhouse period. Most palaeoclimatic data, however, have been derived from European basins, and these data show an increase of the palaeotemperature from the Oxfordian to the Tithonian. In the present study we for the first time present such data from the Ouarsenis Mountains, northwest of Algeria (southern margin of the Tethyan Ocean). For this purpose, brachiopods, aptychi and belemnites have been studied under cathodoluminescence and scanning electron microscopy. Subsequently, only 55 belemnites have been taken for the isotopic analysis after eliminating the diagenetically altered specimens.

Their $\delta^{18}\text{O}$ values range from -0.35 ‰ to -3.88‰. To translate these values to temperatures, $\delta^{18}\text{O}$ values of 0‰ for the ambient sea-water have been used. In summary, warm and stable temperature conditions in the course of the Late Jurassic have been recorded. The average temperature in the Transversarium Zone (Middle Oxfordian) is 27.8 °C, in the Bimmamatum Zone 27.0 °C, in the Planula Zone (Late Oxfordian) 27.5 °C, in the Early Kimmeridgian 26.2 °C, and in the Hybonotum Zone (Early Tithonian) 27.3 °C.

In order to estimate the latitudinal temperature gradient, the obtained data from the Ouarsenis Mountains (NW-Algeria), which were situated at tropical palaeolatitude of about 20 °N during the Late Jurassic, have been compared with coeval belemnites from higher latitudes (up to 50 °N) (Poland, Scotland and Russia). The results show parallel gradient to today during the Late Jurassic. However, some anomalies that could be linked either to changes in oceanic circulation patterns affecting temperature conditions in European study areas or regional changes in $\delta^{18}\text{O}$ values within European basins have been observed. Thereby, the results point to comparatively stable temperature conditions throughout the Late Jurassic and challenge the earlier proposal of a global warming in this time interval.

Key words : stable isotopes, belemnites, palaeotemperature, Late Jurassic, Latitudinal temperature gradient, Ouarsenis Mountains, Algeria.



Les anomalies en mercure des bassins d'avant-pays pyrénéens comme marqueurs du volcanisme au cours du PETM

Maxime Tremblin^{1*}, Hassan Khozyem², Thierry Adatte³, Jorge E. Spangenberg⁴,
Charlotte Fillon⁵, Arnaud Grauls⁶, Eric Lasseur⁷, Jean-Yves Roig⁷, Olivier
Serrano⁷, Sylvain Calassou⁵, François Guillocheau⁸, Sébastien Castelltort¹

¹ Department of Earth Sciences, University of Geneva, Switzerland.

² Department of Geology, Aswan University, Egypt

³ Institute of Earth Sciences, University of Lausanne, Switzerland.

⁴ Institute of Earth Surface Dynamics, University of Lausanne, Switzerland.

⁵ TOTAL, CSTJF, France

⁶ Department of Geosciences, TERECA, France

⁷ BRGM, French Geological Survey, France

⁸ Géosciences Rennes, Université de Rennes, France

Le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène (PETM ; ~55,6 Ma) est caractérisé par une importante perturbation du cycle du carbone et par un réchauffement climatique global. La libération importante de carbone associée à la mise en place des grandes provinces ignées (LIP) est un des phénomènes soupçonnés d'être responsable du PETM. L'étude des anomalies en mercure (Hg) peut être utilisée comme un marqueur de volcanisme et peut donc fournir des indices quant aux relations possibles entre la mise en place des LIP et le PETM.

Dans cette étude un enregistrement à haute résolution du $\delta^{13}\text{C}$ et des concentrations en Hg a été réalisé au niveau de quatre sites des bassins d'avant pays de l'orogène pyrénéen. Ces sites permettent l'étude des perturbations du cycle du carbone et du mercure le long d'un transect continent-océan au cours du PETM.

Les données obtenues dans ce travail révèlent l'occurrence de deux excursions négatives dans le signal isotopique en carbone (NCIE). La plus importante de ces NCIE est interprétée comme étant l'enregistrement du PETM tandis que la seconde, de plus petite amplitude, comme étant celui du POE («*Pre-onset excursion*»). Ces deux NCIE sont systématiquement associées à d'importantes anomalies en Hg. Ces résultats montrent donc que d'importantes phases de volcanisme, probablement associées à la mise en place de la Province Ignée Nord-Atlantique (NAIP), ont contribué au déclenchement et à la relative longue durée du PETM. En outre, les résultats de cette étude mettent en évidence la possibilité d'obtenir des informations sur les événements climatiques extrêmes à partir de sédiments déposés au sein de domaines tectoniques actifs. Enfin, l'enregistrement géochimique obtenu ici permet de définir des lignes isochrones robuste et ainsi de proposer une corrélation stratigraphique entre différentes formations de la chaîne orogénique pyrénéenne.

Ces travaux sont financés et réalisés dans le cadre du projet BRGM-TOTAL Source-to-Sink.

Mots-Clés : PETM, Mercure, Signal isotopique, Volcanisme, NAIP, Bassin d'avant pays pyrénéens



Hafnium-neodymium isotope evidence for enhanced weathering and tectonic-climate interactions during the Late Cretaceous

Pauline Corentin ^{*1}, Emmanuelle Pucéat ¹, Pierre Pellenard ¹, Michel Guiraud ¹, Justine Blondet ¹, Nicolas Freslon ^{1,2}, Germain Bayon ³, Thierry Adatte ⁴

¹Biogéosciences, UMR 6282 CNRS, Université Bourgogne Franche-Comté, France

² ISTO - Université d'Orléans, CNRS, BRGM, UMR 7327, France

³IFREMER, Unité de Recherche Géosciences Marines, France

⁴Institute of Earth Sciences, Géopolis, University of Lausanne, Switzerland

Over million-year timescale the carbon cycle, central for atmospheric CO₂ evolution, is driven by mantle CO₂ degassing (source) and by continental weathering that drawdown CO₂ through silicate weathering reactions (sink).

Based on a novel geochemical proxy of the chemical weathering intensity (the combined Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in clays), associated to clay mineralogy, we discuss the links between tectonic, continental weathering and climate evolution during the late Cretaceous. That period records the very first step of the last greenhouse-to-icehouse transition and is concomitant to major uplift phases affecting the margins of both Africa and South-America.

Three sites along the South American and the African atlantics margins (IODP 356, 959 and 1259) were targeted based on their relatively complete record of upper Cretaceous sediments and on their location on both margins.

Our new results for the site 356 point to the occurrence of enhanced chemical weathering during the Campanian following the uplift of the Southeastern Brazilian margin that promoted the establishment of more hydrolysing conditions. At Demerara Rise (Site 1259), our data suggest a decoupling between physical erosion and chemical weathering, that may be explained in this area by a weaker tectonic pulse within a continuing hydrolysing climate. Chemical weathering intensity at this site rather appears to follow the evolution of global temperature. By contrast, at site 959 on the African margin, our data point to an increase in chemical weathering of the margin during the Santonian and Campanian with more pronounced fluctuations than the other sites, suggesting a combined control of both tectonic and climate.

New data from these 3 regions that encountered different climatic, geologic and tectonic conditions suggest that chemical weathering markedly intensified at all sites during the late Cretaceous and likely point to a major role of tectonic uplift in the late Cretaceous global cooling.

Key Words: late Cretaceous – paleoclimate – weathering – uplift - clay mineralogy – Hf-Nd isotope



T11.4. Archives continentales pré-Quaternaire : Paléoclimats, Paléoenvironnement



Reconstruction of extreme events (storms, floods and tsunamis) from the coastal sedimentary files in the Coquimbo region, 30 ° S, Chile.

Karen Araya * ^{1,3}, Laurent Dezileau ², Praxedes Muñoz ³, Antonio Maldonado ⁴, Kevin Pedoja²

¹ Laboratoire de Geosciences, Université de Montpellier. Francia

² Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière, UMR CNRS 6143 M2C, Université de Caen-Normandie. Francia

³ Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Católica del Norte, Chile

⁴ Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), Chile

Floods, extreme storms and tsunamis are natural disasters that have marked the history of the Chilean coast. The recent flood event that hit several regions in northern Chile occurred in 2015, where the Atacama region was the most affected, causing the death of some 28 people, the disappearance of 48 people and economic losses estimated at \$ 1.5 billion.

One of the characteristics of these extreme events is their ability to leave sedimentary traces that can be studied and dated to know their spatial and temporal evolution, which is necessary for the implementation, adaptation and mitigation strategies to protect the population from futures events.

In this study, we analyzed sedimentary files collected in the Coquimbo region to identify sedimentary traces of extreme events that affected the Chilean coast. Analysis of granulometry (laser granulometry), geochemistry (XRF) and chronology (¹⁴C, ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs) were performed. The grain size and geochemistry results showed the presence of seven alluvial levels characterized by high K content and fine grain size and two events of marine origin were visualized, characterized by coarse grain and high content of Ca and Sr. The dating of these levels is in progress to identify the time in which they occurred.

Project: FONDECYT-1180413/ FONDECYT-1140851/ClapPrograme

Keywords: Storms, Floods, Tsunamis, Chile.



Quantifying sedimentation rates during early rifting. Tectonic versus climate controls on fluvial sedimentation in the Plio-Pleistocene Corinth rift (Greece)

Romain Hemelsdaël ^{*1}, Julien Charreau ², Mary Ford ², Maria Sekar Proborukmi ³,
Fabrice Malartre ⁴, Brigitte Urban ³, Pierre-Henri Blard ².

¹ Université de Montpellier - CNRS - Géosciences Montpellier - France

² Université de Lorraine - CNRS - CRPG, Vandœuvre-lès-Nancy - France

³ Institute of Technology of Bandung - Indonesia

⁴ GéoRessources- ENSG - Vandœuvre-lès-Nancy, France

⁵ Leuphana University - Lüneburg, Germany

We present a multi-method approach to the dating of Plio-Pleistocene fluvial sediments deposited in the early Corinth rift (Greece). We provide estimates of sediment accumulation rates and discuss the relative controls of tectonics and climate on continental rift sedimentation.

During the Plio-Pleistocene the antecedent Kalavryta fluvial system (30 km long) developed across several active normal fault blocks in the early Corinth rift. These blocks are now uplifted along the southern rift margin. The alluvial architectures are characterised from the proximal basin margin to the river outlet. In four magnetostratigraphic sections, the correlations to the reference scale are mainly based on the identification of the Gauss/Matuyama magnetic reversal and rare biostratigraphic age constraints. The fluvial succession is dated between about 3.6 and 1.8 Ma, with sediment accumulation rates from 0.40 to 0.75 mm/yr. In the context of overfilled intra-mountainous rift basins, these are minimum rates and can be used as a proxy for accommodation rate. Therefore this succession, deposited by an antecedent river system, records not only high sedimentation rates but also high subsidence rates. We propose that continuous high sediment supply generated differential loading of hangingwall depocentres and enhanced subsidence during normal fault growth.

Finally, in the distal river system, the vegetation types identified through pollen analysis in the alternating fluvio-deltaic and shallow lacustrine deposits, are coherent with the relative lake level variations. Dry/cool climate is preferentially recorded in mouth bars and deltaic plain deposits during periods of low lake level, while a wet/warm climate is recorded in prodelta deposits during periods of high lake level. This correlation suggests that, despite the dominant control of active faulting, climate plays a key role in controlling syn-rift stratigraphic architectures and facies types and distributions.

Keywords : rift initiation, antecedent river system, alluvial architecture, deltaic unit, sediment supply, magnetostratigraphy, sediment accumulation rate, palynology, climate signal



Early syn-rift sedimentation and paleoenvironments in the eastern most end of the Corinth rift (Greece): IODP 381 Hole Moo80A.

Romain Hemelsdaël*¹ Rob Gawthorpe², IODP Expedition 381 Scientific Party Team

¹ Géosciences Montpellier - France

² Bergen University - Norway

The IODP 381 was conducted in 2017 in the Gulf of Corinth (Greece) to obtain high spatial and temporal records of the dynamics of the rifting processes. The present study focuses on the drilled site Moo80A, located in the easternmost end of the Corinth rift (Gulf of Alkyonides). The basal units 3 and 4 of Moo80A provide a precious record of the early rift sedimentation, drainage system evolution and changing environments. This work aims at deciphering the relative impact of tectonics and climate on the early syn-rift sedimentation.

In hole Moo80A, the unit 3 is characterised by terrestrial deposits, and the unit 4 is primarily consists of carbonate-rich sand, silt and mudstones interpreted to represent a shallow saline lake to intermittently subaerial environment. These units devoid of biostratigraphic marker species (microfossils and calcareous nanofossils) are not yet dated. Based on preliminary correlations with the onshore Megara Basin, the studied succession is likely to have been deposited from Pliocene and Lower Pleistocene, and possibly includes Upper Miocene sediments. To provide age constraints we rely on the identification and dating of tephras layers, as well as U-Pb dating of ostracod shells. In association to this dating project, stratigraphy of units 3 and 4 is established, including transitional to abrupt changes of alluvial architectures and environments. Moreover, XRF core scanning enables to track chemical variations of terrigenous inputs, here used for source provenance study, and as a proxy of continental weathering and climate variations.

Both qualitative and quantitative results are used to decipher the sedimentary response to rifted landscape evolution as the result of fault activity, rift flank uplift, Mediterranean climate changes and sea level fluctuations. We propose new paleogeographic reconstructions of river systems across the rifted margin, with special focus on the transitions from fluvial to lacustrine and marine environments.

Keywords : Corinth rift, Alkyonides Gulf, rift initiation, Mediterranean climate, alluvial fan, nearshore to coastal plain, saline to freshwater lake, tephras, XRF scanning, U-Pb dating.



Étude paléoenvironnementale et paléoclimatique multi-proxies des bassins fini-carbonifères à permien du N-E du Massif central.

Mathilde Mercuzot^{*1}, Pierre Pellenard², Sylvie Bourquin¹, Christophe Thomazo²,
Mathieu Martinez¹, Laurent Beccaletto³, Johann Schnyder⁴, François Baudin⁴

¹Géosciences Rennes - UMR 6118, Université Rennes 1, CNRS, France

²Laboratoire Biogéosciences, UMR CNRS 36282/uB, Université Bourgogne Franche-Comté, Dijon, France

³BRGM, Georesources Division, Orléans, France

⁴Institut des Sciences de la Terre de Paris (iSTeP), UMR 7193 CNRS, Sorbonne Université, Paris 6, France

Les bassins intracontinentaux fini-carbonifères à permien d'Autun et de Decize-La Machine (NE du Massif central) ont fait l'objet d'un travail de thèse s'appuyant sur de nombreuses méthodes d'analyse appliquées à haute résolution sur des données de forages et quelques coupes.

Les interprétations des résultats sédimentologiques (faciès, diagraphies, sismique), de stratigraphie séquentielle, de géochimie et isotopie organique (carbone et azote) et de minéralogie ont permis de reconstituer de la manière la plus précise possible l'évolution des environnements sédimentaires de ces bassins dans l'espace et au cours du temps.

Il en ressort que les deux bassins étudiés dominés par des dépôts lacustres et deltaïques constituaient de plus grandes aires de sédimentation que ce qui est actuellement admis, et que des facteurs locaux ont contrôlés la formation et la préservation de certains dépôts sédimentaires, tels que les niveaux riches en matière organique (charbons et black shales).

L'étude des assemblages argileux montre que ces niveaux se formaient dans des conditions de ruissellement continental modéré, traduisant des périodes relativement moins humides, cohérentes avec des flux sédimentaires réduits.

Un traitement du signal a été appliqué sur ces données géochimiques et minéralogiques afin de déterminer si ces proxies reflètent un potentiel rôle des cycles orbitaux. Les analyses cyclostratigraphiques suggèrent que les dépôts organiques seraient conditionnés par les cycles de petite excentricité et de précession des équinoxes. Les données minéralogiques ne montrent pas ces cycles ce qui tend à montrer que de multiples facteurs ont pu influencer l'évolution minéralogique des séries sédimentaires étudiées. Ces cycles, couplés à des âges radiochronologiques précis, permettent de contraindre des taux de sédimentation et des durées de dépôt pour les séries continentales du bassin d'Autun, qui sont cohérents avec les systèmes lacustres actuels en contexte tectoniquement actif.

Mots-Clés : Carbonifère, Permien, continental, cyclostratigraphie, géochimie, argiles



Paleoenvironmental reconstructions and sequence stratigraphy model of a deep lake to alluvial plain system evolution of a rift basin: an example from the Paleogene Vistrenque graben (SE France)

Nazim Semmani ^{*1}, François Fournier ¹

¹ Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, Cerege, Um 34

The Vistrenque graben is a Cenozoic rift basin located in the western part of the Camargue (SE France). It extends over 50*30 Km² and is assumed to be the deepest Cenozoic graben in the SE of France.

The Gallician sector situated in the middle compartment of the graben has a dense coverage of subsurface data and is relevant to investigate the depositional environments and the temporal evolution of the rift basin. Detailed cores and thin sections analysis of the Paleogene deposits from deep wells (Gal 1-9 & Vauvert 1) allow the identification of depositional facies associations and the stratigraphic interpretation of the sedimentary units.

Offshore lake to bench slope facies associations indicated by the dominance of gravity-driven sedimentation are frequent in the lowermost interval (*Série grise* formation) and suggest deep lake settings controlled by a relatively steep slope subjected to seismic and gravity destabilization. A major change in the sedimentation pattern has been evidenced by the development of shallow lake to palustrine facies with increasing occurrence of fluvial to alluvial facies in the overlying *Série calcaire* and *Série mixte* formation. The shift in depositional facies point to the evolution of the sedimentary system towards a shallow, gently steeped ramp type system undergoing repeated subaerial exposure. In the topmost *Série rouge* formation, the sedimentation is marked by the development of alluvial floodplain deposits across the Vistrenque graben and suggest the ultimate filling of the lake during a period of tectonic quiescence prior to the return to evaporative lake and playa environments in the Upper Oligocene (*Série Calcaréo-salifère*).

U/Pb absolute age dating yielded an early to middle Rupelian age for the subaerial exposure at the top of *Série calcaire* formation. Regional scale correlations of climatic-driven sedimentary events supported by palynological data give clues to precise the chronostratigraphic framework of the Vistrenque graben.

Mots-Clés : Paleogene, lacustrine, graben, facies, stratigraphy, U/Pb age



Extension septentrionale des mangroves lors de quatre maxima thermiques (56 Ma, 51-49 Ma, 17-15 Ma, aujourd'hui)

Speranta-Maria Popescu¹, Jean-Pierre Suc^{2*}, Séverine Fauquette³, Mostefa Bessedik⁴, Gonzalo Jiménez-Moreno⁵, Jean-Claude Plaziat⁶, Cécile Robin⁷

- 1, Geobiostratdata.consulting, Rillieux la Pape, France.
- 2, Institut des Sciences de la Terre de Paris, Sorbonne Université, France.
- 3, Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier, Université de Montpellier, France.
- 4, Laboratoire de Paléontologie Stratigraphique et Paléoenvironnement, Université d'Oran 2, Algérie.
- 5, Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Universidad de Granada, Espagne.
- 6, Département des Sciences de la Terre, Université Paris-Sud, Orsay, France.
- 7, Géosciences Rennes, Université de Rennes, France.

La distribution des mangroves actuelles et passées est importante car elle documente les paléoclimats. Essentiellement intertropicales, les mangroves comptent des végétaux, notamment des palétuviers, appartenant aux genres *Rhizophora*, *Bruguiera*, *Ceriops* et *Kandelia* (Rhizophoraceae), *Sonneratia* (Lythraceae), *Avicennia* et *Acanthus* (Acanthaceae), *Aegialitis* (Plumbaginaceae), *Scyphiphora* (Rubiaceae), *Excoecaria* (Euphorbiaceae), *Brownlowia* (Malvaceae), *Pelliciera* (Tetrameristaceae), *Xylocarpus* (Meliaceae), *Nypa* et *Phoenix* (Arecaceae), etc. (Tomlinson, 1986). Leurs grains de pollen sont identifiables au microscope, plus difficilement chez les Rhizophoraceae. La Palynologie est donc une science indispensable pour retracer l'histoire des mangroves (Plaziat *et al.*, 2001). Actuellement, *Avicennia* atteint en Atlantique Nord-Ouest et au Pacifique Sud-Ouest des latitudes supérieures aux autres palétuviers, comme *Rhizophora*, avec un écart allant jusqu'à 8° (Plaziat, 1995; Quisthoudt *et al.*, 2012), en raison de courants marins chauds et(ou) de la tolérance d'*Avicennia* à des températures plus basses de l'air et de l'eau. Au Miocène moyen (17-16 Ma), *Avicennia* peuplait les rivages méditerranéens (Bessedik, 1981; Jiménez-Moreno & Suc, 2007) avec une extension maximale de 47 à 49°N (Nagy & Kókay, 1991; Jiménez-Moreno *et al.*, 2008). Les données disponibles sur les façades atlantiques sont très rares mais on peut estimer un écart latitudinal d'environ 19° entre l'expansion septentrionale d'*Avicennia* et les mangroves diversifiées (Graham, 1995). A la limite Paléocène-Eocène (PETM : 56 Ma) et à l'Eocène inférieur (EECO : 51-49 Ma), *Avicennia* atteignait le cercle arctique (Suan *et al.*, 2017; Salpin *et al.*, 2019) voire le pôle (Suc *et al.*, 2020). Un transect atlantique suggère que l'écart latitudinal avec les mangroves diversifiées était alors supérieur à 21°. Pour quelle raison cet écart latitudinal s'est-il réduit au cours du temps ?

- Bessedik M., 1981. *C.R. Acad. Sci. Paris sér. II* 293, 469-472. Graham A., 1995. *Biotropica* 27, 20-27.
 Jiménez-Moreno G., Suc J.-P., 2007. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 253, 224-241. Jiménez-Moreno G. *et al.*, 2008. *Journ. Biogeogr.* 35, 1638-1649.
 Nagy E., Kókay J., 1991. *Acta geol. Hungarica* 34, 1-2, 45-52.
 Plaziat J.-C., 1995. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 83, 73-96.
 Plaziat J.-C. *et al.*, 2001. *Wetlands Ecol. Manag.* 9, 161-179. Quisthoudt K. *et al.*, 2012. *Trees* 26, 1919-1931.
 Salpin M. *et al.*, 2019. *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper* 541-27, 637-664. Suan G. *et al.*, 2017. *Geology* 45, 539-542.
 Suc J.-P. *et al.*, 2020. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 551, 109755. Tomlinson P.B., 1986. *The botany of mangroves*. Cambridge Univ. Press.

Mots-clés : Palynologie, mangroves, *Avicennia*, autres palétuviers.



Quelle influence du forçage orbital sur le climat et les biomes de l'Éocène et de l'Oligocène ?

Delphine Tardif^{1,2*}, Agathe Toumoulin², Frédéric Fluteau¹, Yannick Donnadieu²,
Guillaume le Hir¹, Alexis Licht³, Guillaume Dupont-Nivet^{4,5}, Natasha Barbolini⁶, Carina
Hoorn⁷, Jean-Baptiste Ladant⁸, Pierre Sepulchre⁹, Nicolas Viovy⁹

1 Institut de physique du globe de Paris, CNRS, Université de Paris, 75005 Paris, France

2 Aix Marseille Université, CNRS, IRD, INRA, Collège de France, CEREGE, Aix-en-Provence, France

3 Department of Earth and Space Sciences, University of Washington, Seattle, Washington

98195, USA 4 Géosciences Rennes, UMR CNRS 6118, Univ Rennes, Rennes, France

5 Institute of Geosciences, Potsdam University, Potsdam, Germany

6 Department of Ecology, Environment and Plant Sciences and Bolin Centre for Climate Research, Stockholm University, SE-106 91 Stockholm, Sweden

7 Department of Ecosystem and Landscape Dynamics, Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics, University of Amsterdam, 1098 XH The Netherlands.

8 Department of Earth and Environmental Sciences, University of Michigan, Ann Arbor, USA

9 Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE/IPSL, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France

La transition de l'Éocène *Greenhouse* vers l'Oligocène *Icehouse* (~40 à 32 Ma) résulte de l'interaction entre une baisse du CO₂, des changements paléogéographiques et le forçage orbital. Cependant, son expression en termes de biomes et de climats sur les continents est très hétérogène : certaines régions semblent n'enregistrer aucun changement (Patagonie, Afrique), alors que d'autres sont profondément impactées (Asie, Amérique du Nord) (Pound et Salzmann, 2017, Hutchinson et al., 2020). En outre, la Grande Coupure, un événement majeur de dispersion faunistique de l'Asie vers l'Europe et l'Amérique du Nord se produit tardivement (~ 34 Ma), bien après la mise en place des ponts terrestres reliant ces continents (dès ~38 Ma) (Akhmetiev et Zaporozhets, 2014). Cela suppose que d'importantes contraintes climatiques ont empêché ces migrations d'avoir lieu plus tôt. De plus, lorsque la résolution stratigraphique le permet, le forçage orbital est clairement enregistré dans différentes régions du globe, et pourrait avoir induit une importante variabilité climatique à cette époque, comme le suggèrent différentes études de modélisation (Licht et al., 2014, Zhang et al., 2012, Keery et al., 2018).

A l'aide du modèle de système terre IPSL-CM5A2 et de végétation dynamique ORCHIDEE, nous testons des configurations orbitales extrêmes sur une paléogéographie tardi-Eocène, afin d'évaluer leur impact sur le climat et la végétation de cette période. Nos résultats montrent deux aspects majeurs : (1) les régions subtropicales du sud-est asiatique pourraient avoir connu périodiquement un régime de mousson, en alternance avec des périodes plus sèches ; (2) les ponts continentaux étroits tels que les détroits de Béring et de Turgai présentent d'importants changements de végétation en fonction de l'obliquité, allant de la forêt tempérée à des zones arbustives ouvertes. Nous proposons que le forçage orbital a pu induire des barrières climatiques et/ou biologiques périodiques contre la dispersion de la faune, et pourrait donc avoir contraint la Grande Coupure américaine et européenne.

Mots-Clés : Éocène, Oligocène, forçage orbital, climat, végétation, mousson, dispersion faunique



T11.7 Perspectives en géologie des carbonates



Environmental vs. biological factors ruling the development of fossil and living microbialites in Laguna de los Cisnes, southernmost Chile

Clément Pollier ^{1,*}, Alejandro Nuñez Guerrero ², Jorge Rabassa ³, Daniel Ariztegui ¹

¹ Department of Earth sciences, University of Geneva - Switzerland

² Centro Universitario, Universidad de Magallanes, Porvenir, Tierra del Fuego - Chile

³ CADIC-CONICET, Ushuaia, Tierra del Fuego - Argentina

Microbialites are organo-sedimentary deposits resulting from the activity of a microbial consortia. The prevailing environmental conditions during their formation can also have major implications in their development. The lack of detailed studies of modern examples, however, prevent a complete understanding of the different factors ruling microbialite formation.

Laguna de los Cisnes in southernmost Patagonia (Chile) is part of a set of lakes formed during the retreat of the ice following the last glaciation. Subsequently, the lake was densely colonized by microbial mats that developed the presently living and fossil microbialites. We present here the first detailed geomorphological, geochemical and geomicrobiological study. These organo-sedimentary deposits have an extension of almost 8 km² encompassing four principal macro-morphologies exceptionally large with maximum heights and widths of 1.5 m and 5.0 m, respectively. Crater-like shapes are dominant displaying a spherical to elongated character most frequently unfilled. This particular macro-morphology seems clearly controlled by the prevailing environmental conditions as shown by a systematic orientation of their elongated shapes perpendicular to the coastline. In addition, there is also a relational increase in the height of the microbialites with water depth most probably to adapt to reducing light conditions during increasing lake water levels. Microscopic observations of the fossil microbialites as well as of the living microbial communities show that they both are quite uniform. A dense lamellar carbonate in the bottom appears associated with sulfate-reducing bacteria on top of which microbialites further develop with a shrub-like fabric. The latter is most probably due to the escape of bubbles resulting from cyanobacteria photosynthetic activity.

The occurrence of extraordinary well-preserved fossil outcrops along with living microbialites allows to develop a model of formation. This model can be further applied not only to this exceptional site but also to other microbialites outcropping at different geographical and temporal scales. It can also provide innovative data that can be used in the search of the cradle of life in both early Earth as well as another planets.

Mots-Clés : microbialites, living, fossil, southernmost Chile



Relation entre déformation intraplaque et cimentation des calcaires du Jurassique de l'est du Bassin de Paris révélée par géochronologie U-Pb et thermométrie Δ_{47} de la calcite

Thomas Blaise ^{*1}, Benjamin Brigaud ¹, Cédric Carpentier ², Xavier Mangenot ³,
SidAhmed Ali Khoudja ¹, Philippe Landrein ⁴

¹ Université Paris-Saclay, CNRS, GEOPS, 91405, Orsay, France

² Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources, 54500 Nancy, France

³ Caltech, Geological and Planetary Sciences, 91106, Pasadena, CA, USA

⁴ Agence Nationale pour La Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA), Centre de Meuse/Haute-Marne, RD 960, 55290 Bure, France

La concomitance entre phase de déformation intraplaque, fracturation, cimentation des fractures et développement des ciments intergranulaires dans de grands volumes (échelle du réservoir ou du bassin) est souvent suggérée mais rarement établie. Dans cette étude, nous proposons de reporter les âges U-Pb et les températures de cristallisation de calcites comblant à la fois les fractures et l'espace poral intergranulaire des formations carbonatées du jurassique moyen et supérieur de l'est du Bassin de Paris.

La cimentation s'opère par des circulations de fluides lors de l'ouverture de réseaux de fractures et microfractures. Nous proposons une reconstitution chronologique des différents stades de cristallisation par géochronologie U-Pb *in situ* sur les différentes générations de calcite identifiées au préalable selon des critères pétrographiques.

Une première phase datée fini-Jurassique à début Crétacé est particulièrement bien exprimée dans le Dogger, attribuée à l'ouverture de l'Atlantique central. Une seconde phase pyrénéenne précoce (« laramienne ») est identifiée, d'âge fini-Crétacé à début Cénozoïque. Des cristallisations d'âge Eocène sont ensuite attribuées à la phase paroxysmale de la compression pyrénéenne. L'extension Eocène/Oligocène, à l'origine du système de rift ouest-européen, est également reconnue. Enfin, les derniers épisodes de cristallisations sont datés du Miocène, et pourraient être la conséquence de la propagation des contraintes alpines au sein du domaine intraplaque européen.

Ainsi, grâce à la datation radiométrique et à la thermométrie Δ_{47} des cristaux de calcite, une paragenèse calibrée en temps et températures est proposée, mettant en avant le rôle de la déformation intraplaque dans l'ouverture des réseaux de fractures et la cristallisation des ciments calcitiques.

Mots-Clés : Bassin de Paris, carbonates, géochronologie U-Pb, thermométrie Δ_{47} , diagenèse



Formation and early diagenesis of cold and freshwater terrestrial carbonates (lake Sevan, Armenia)

Claude Colombié^{*1}, Noémie Bosc¹, Sébastien Joannin², Agathe Martignier³,
Mathieu Schuster⁴, Edwige Pons-Branchu⁵, Lilit Sahakyan⁶

¹ Laboratoire de Géologie de Lyon : Terre, Planètes, Environnement (LGL-TPE) – CNRS : UMR5276 – Université Claude Bernard Lyon 1 – France

² Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier (ISEM) – CNRS : UMR5554 – Université de Montpellier – France

³ Department of Earth Sciences, University of Geneva, Switzerland

⁴ Institut Terre & Environnement de Strasbourg (ITES) – CNRS : UMR7063 – Université de Strasbourg – France

⁵ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE/IPSL), CEACNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay, France

⁶ Institute of Geological Sciences, National Academy of Sciences of Republic of Armenia, Armenia

Processes involved in terrestrial carbonate formation and early diagenesis in cold and freshwater conditions remain poorly understood.

Lake Sevan is one of the largest freshwater high-altitude lakes in Eurasia. Supplied with alkaline water and siliciclastics, it occupies a pull-apart basin that developed along the major active Pambak-Sevan-Sunik fault system. Its intense exploitation during the Soviet period lowered the water level by 20 meters and revealed several generations of paleoshorelines. At Shorja, paleoshorelines are beach-ridge conglomerates with carbonate cements and microbialite-type encrustations and adjoin a beach where they are currently being reworked. These paleoshorelines are therefore ideal to study freshwater and cold-water terrestrial carbonates and estimate the part of abiotic and biotic processes in their formation and early diagenesis.

Radiocarbon and U/Th dating are underway to determine the age of the paleoshorelines. Field observations were realised to establish an inventory of the different type of conglomerates and encrustations observed. Optical and cathodoluminescence microscopy analyses were performed to characterize microfacies and cement generations, respectively. All these deposits were also characterized by scanning electron microscopy coupled with analytical detectors.

The first date acquired is 1355 yr cal. BP. Unconformities indicate composite paleoshorelines in which cements are abundant and diversified, implying a long and complex history. Micritic coatings and several types of peloidal and microsparitic cements precede encrustations, which are either microsparitic or micritic depending on their location in the paragenetic sequence and seem to need a hard substrate to grow. Encrustation features are the same from one paleoshoreline to another, suggesting either similar primary conditions or early diagenetic homogenization. The paragenetic sequence ends with pores that indicate emersive and dissolution episodes.

These preliminary results lead to a first conceptual scheme that addresses the chronological organization of the processes involved in the formation and early diagenesis of these cold and freshwater terrestrial carbonates. These processes are abiotic or biotic and directly linked to high-frequency lake-level changes.

Keywords: terrestrial carbonates, microbialite-type encrustations, early diagenesis, abiotic vs. biotic processes

^{*}Intervenant



Influence des facteurs de contrôle sur l'évolution d'une plateforme carbonatée en domaine intracratonique : les dépôts de l'Aalénien à l'Oxfordien du bassin Aquitain

Quentin Deloume-Carpentras^{*1,2}, Simon Andrieu¹, Benjamin Brigaud², Eglantine Husson¹, Éric Lasseur¹, Jocelyn Barbarand²

¹BRGM, Bureau des Ressources Géologiques et Minières, France

²Université Paris-Saclay, CNRS, GEOPS, France

La production carbonatée et l'architecture sédimentaire dépendent de l'interaction de facteurs complexes qui contrôlent le développement d'une plateforme comme le climat, les variations eustatiques, la tectonique et l'héritage structural. L'objectif est de comprendre les liens entre accommodation, subsidence tectonique, producteur carbonaté et architecture stratigraphique.

La description de 82 affleurements et 28 forages a permis la réalisation de 5 transects de corrélation, ainsi que des cartes de taux d'accommodation et de subsidence tectonique des dépôts Aalénien-Oxfordien du bassin Aquitain.

Au cours de l'Aalénien et au Callovien-Oxfordien inférieur, en période de climat humide, les taux de production carbonatée sont faibles, une forte subsidence tectonique est associée à des marnes et des faciès *heterozoan* et favorise l'ennoiment de la plateforme. Les subsidences tectoniques modérées et les zones en *uplift* sont associées à des faciès *photozoan*.

Au Bajocien/Bathonien, climat chaud et sec et à période de bas niveau eustatique, une forte subsidence tectonique est associée à une très forte production carbonatée et des faciès *photozoan* tandis qu'une faible subsidence tectonique est caractérisée par une faible production carbonatée et des faciès *heterozoan*.

L'Oxfordien moyen-supérieur est marqué par un climat sec, un niveau eustatique élevé et un fort taux de productions carbonatées. Les zones en *uplift* favorisent le développement de faciès *photozoan* et le maintien d'une faible bathymétrie. La subsidence tectonique favorise l'ennoiment de la plateforme.

Dans le système carbonaté Aalénien-Oxfordien du bassin Aquitain, le climat a une influence sur les taux de production carbonatée et les types de producteurs. Cependant les variations spatiales de faciès ne peuvent être expliquées uniquement par le climat. L'influence combinée de la tectonique et de l'eustatisme sur le maintien d'une faible bathymétrie permet ainsi le développement de la plateforme.

Mots-Clés : faciès, producteur carbonaté, accommodation, tectonique, architecture stratigraphique, facteurs de contrôle, bassin Aquitain

*Intervenant



Influence de la géodynamique sur la circulation des fluides et la diagenèse des dépôts carbonatés Aalénien-Oxfordien de la bordure nord-est du bassin Aquitain

Quentin Deloume-Carpentras ^{*1,2}, Benjamin Brigaud ¹, Simon Andrieu ², Eglantine Husson ², Thomas Blaise ¹, Frédéric Haurine ¹

¹Université Paris-Saclay, CNRS, GEOPS, France

²BRGM, Bureau des Ressources Géologiques et Minières, France

La gestion des aquifères en domaine carbonaté nécessite une caractérisation détaillée pour une meilleure gestion de la ressource hydrique. Les propriétés réservoirs sont affectées par différentes phases de circulation de fluides conduisant à des phases successives de dissolution-recristallisation.

Cette étude se concentre sur les dépôts carbonatés Aalénien-Oxfordien du Quercy-Périgord du bassin Aquitain, qui constituent une zone clé pour répondre aux questions suivantes : les phases de cimentation/dissolution peuvent-elles être liées à des événements géodynamiques

? Comment une phase de dissolution peut-elle être datée ?

Une étude pétrographique sur des ciments de calcite et dolomite a été détaillée sur environ 250 lames minces. Puis couplée avec une étude géochimique comprenant isotopie stable, éléments majeurs et traces, éléments ultra-trace et géochronologie U-Pb.

Les premières calcites de blocage hydrothermale (Cal1), datée du Jurassique supérieur au Crétacé inférieur, sont synchrones avec le rifting du Golfe de Gascogne. Une phase de dolomitisation (Dol2) Crétacé remplit les espaces intergranulaires, cette dolomite est ensuite affectée par une dissolution conduisant à la formation de pores moldiques et vacuolaires. Ensuite, des phases successives de calcite de blocage d'origine météorique (Cal2, Cal3 et Cal4), synchrone avec l'orogénèse pyrénéenne, remplissent des cavités de dissolution et des fractures et sont datées respectivement du Campanien, Danien-Selandian et Lutetien-Ypressien. Enfin, la dernière calcite de blocage (Cal5) précipite au cours de la télogénèse lors de l'incision des vallées au Miocène et remplit des cavités karstiques.

Cette étude permet de proposer un *timing* précis des étapes successives de cimentation-dissolution et de relier les circulations de fluides à la géodynamique. Les périodes de porogénèse sont contraintes par des calcites datés avant et après les processus de dissolution.

Mots-Clés : calcite, dolomite, géochimie, géochronologie, porosité, géodynamique, porogénèse

*Intervenant



Dynamics of soil carbonate growth in the tropical domain

Alexis Licht ^{*1,2}, Julia Kelson ³, Shelly Bergel ², Andrew Schauer ², Sierra V. Petersen ³, Ashika Capirala ², Katharine Huntington ², Guillaume Dupont-Nivet ^{4,5}, Zaw Win ⁶, and Day Wa Aung ⁷

¹ Environnement (CEREGE), CNRS : UMR7330, Aix-Marseille University, Aix-en-Provence, France

² Department of Earth and Space Sciences, University of Washington, Seattle WA USA

³ Department of Earth and Environmental Sciences, University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA

⁴ Géosciences Rennes, CNRS : UMR6118, Université de Rennes 1, Rennes, France

⁵ Institut für Geowissenschaften, Universität Potsdam, Potsdam, Germany

⁶ Geology Department, Shwe Bo University, Sagaing Region, Myanmar

⁷ Department of Geology, University of Yangon, Pyay Road, Yangon, Myanmar

Pedogenic carbonate is widespread at mid latitudes where combined warm and dry conditions favor soil carbonate growth in summer. The mechanisms and tempo of pedogenic carbonate formation are less certain in the tropics. There, longer periods of soil water saturation and higher soil respiration enhance calcite dissolution, particularly during summer. However, pedogenic carbonate growth during summer seasons remains the assumption of most studies using stable and clumped isotope proxies on paleosols. To test this assumption, we investigated stable and clumped isotope values from Quaternary and Miocene pedogenic carbonates in the tropical monsoonal domain of Myanmar along an annual rainfall gradient. We show that carbonate growth in Myanmar occurs in the coldest months of the year due to sustained rainfall from mid spring to late fall. Carbonate growth timing locally varies from early winter to early spring; this trend is partly influenced by local rainfall amount, with growth at the wettest sites delayed to spring.

The winter bias in carbonate growth temperatures found in both Quaternary and Miocene Burmese soils, which is so far unique amongst pedogenic carbonates, constitutes a potential signature for past tropical monsoonal (warm summer-wet) climates in paleosols. We propose that high soil moisture year-round in the tropical domain makes carbonate growth more episodic than in temperate ecosystems and particularly sensitive to the seasonal distribution of rainfall. This sensitivity is facilitated by high winter temperatures that allow carbonate precipitation to occur outside of the warmest months of the year. This high seasonal sensitivity is expected to be more prominent in the geological record during times with high temperatures and greater expansion of the tropical realm.

Mots-Clés : Pedogenic carbonate, monsoon, clumped isotopes, stable isotopes, paleosols, paleoclimate



Le canyon le plus profond du monde sur une pente carbonatée

Thierry Mulder^{*1}, Stanislas Wilk¹, Vincent Hanquiez¹, Emmanuelle Ducassou¹,
AndréDroxler², Léa Faubert¹

1 : Université de Bordeaux, UMR 5805 EPOC,
France2 : Rice University, USA

Un canyon de 250 km de long, le *Great Bahama Canyon* (GBC), situé au SE du *Little Bahama Bank* (Bahamas) dans un environnement purement carbonaté est le canyon le plus profond du monde avec un changement bathymétrique de 4500 m. Comme les autres canyons géants des Bahamas, sa direction s'aligne parallèlement à la plateforme avec un probable contrôle par des structures tectoniques profondes. Il est alimenté par le *Northwest Providence Channel* (NPC) et par *Tongue of the Ocean* (TOTO) qui tous deux confluent pour former une branche unique. A l'inverse des autres canyons bahamiens, il ne présente pas de tombants gigantesques et de dépressions géantes associées. Cependant, comme son tracé est subparallèle au *Blake Bahama Escarpment*, il montre une série de tombants et de dépressions de tailles plus modestes mais aussi de *knickpoints* correspondant à la confluence de tributaires. La présence de dépôts d'écoulements en masse suggère que ces derniers assurent la fraîcheur morphologique du canyon. Ses flancs sont abrupts avec de nombreuses cicatrices de glissement et des ravines qui forment des sources latérales d'alimentation. L'analyse des dépôts suggère une différenciation longitudinale et latérale et du débordement permettant la construction de terrasses qui sont des levées confinées. Les dépôts d'écoulements en masse observés dans le canyon présentent des espèces de foraminifères vivant sur la plateforme, cohérente avec une source peu profonde, soit depuis les flancs du canyon ou depuis sa tête. La présence combinée de foraminifères et de bryozoaires vivant sur la pente suggère que les écoulements gravitaires sont érosifs dans le canyon. Finalement, le GBC fonctionne plutôt comme un système chenai-levée confiné que comme un véritable canyon silicoclastique qui incise une marge continentale. Pour cette raison, son profil transversal a une forme de «V tronqué à la base». Une levée confinée de grande taille est observée pour la première fois dans un canyon géant carbonaté à la confluence entre les branches de NPC et TOTO. Elle est probablement formée par l'expansion des écoulements générés par le ressaut hydraulique induit par l'élargissement du chenai à cet endroit. L'alimentation du canyon fonctionne comme un système « on/off » en fonction de ennoiment de la plateforme.

Mots-Clés : canyon, Bahamas, carbonates, pente, écoulements sédimentaires



Synthèse cartographique de la pente des Bahamas

Thierry Mulder^{*1}, Kelly Fauquembergue¹, Vincent Hanquiez¹, Stanislas Wilk¹,
Emmanuelle Ducassou¹, Emmanuelle Poli²

1 : Université de Bordeaux, UMR 5805 EPOC,
France 2 : TOTAL CSTJF, France

Les données anciennes compilées à celles provenant des campagnes récentes permettent de réaliser une synthèse régionale des grands ensembles sédimentaires des Bahamas, de l'*uppermost slope* (-30 à -300 m) aux plaines abyssales (> 4500 m). On y trouve :

- (1) Des canyons géants de plus de 100 km de long, généralement parallèles à la plate-forme et alignés sur des accidents structuraux. Ils sont les reliques du démantèlement de la méga plate-forme crétacée et sont pour l'essentiel alimentés par les déstabilisations de leurs flancs ;
- (2) Des ravines de quelques kilomètres de long, alimentées par le *density cascading* ;
- (3) Des canyons d'une dizaine de kilomètres de longueur dont le fonctionnement semble ancien, pléistocène voire pliocène. Ils se sont formés par érosion régressive jusqu'à un front de cimentation en haut de la pente supérieure. Ils sont sporadiquement alimentés par le phénomène de chasse tidale qui agit après le passage d'ouragans ou de tempêtes tropicales ;
- (4) Un système chenal-levée-lobe actif durant le maximum d'inondation du MIS 5e ;
- (5) Des lobes de dépôts aux embouchures des canyons ;
- (6) Des instabilités qui affectent le haut de pente et qui alimentent les petits canyons et les ravines ;
- (7) Des Complexes de Transport en Masse (MTC) d'extension décamétrique à kilométrique. L'un affecte l'extrémité occidentale du *Little Bahama Bank*, un autre le *Great Bahama Bank*. De nombreux glissements en masse sont visibles au pied du *Blake Bahama Escarpement* (BBE) et marquent probablement la fin de sa mise en place.
- (8) Des monts sous-marins formés par les coraux d'eau froide, parfois dans un *pockmark* ;
- (9) Des *pockmarks* et des dépressions géantes visibles surtout à la base du BBE, en lien avec la circulation de fluides salins dans le réseau karstique ;
- (10) Des corps contouritiques construits par des courants de surface ou profonds qui affectent le fond marin avec éventuellement un *moat* et des traces d'érosion.
- (11) La surface d'érosion pléistocène à l'affleurement, aux endroits où la sédimentation est plus faible. Celle-ci est parfois comblée par le prisme progradant holocène alimenté par le *density cascading*.

Mots-Clés : Corps sédimentaires, élément architectural, Bahamas ; carbonates ; pente



Dépressions sous-marines géantes : un exemple de mécanisme combinant dissolution et érosion mécanique dans un système carbonaté

Mulder, T.^{1*}, Cavailhes, T.¹, Hanquiez, V.¹, Gillet, H.¹, Recouvreur, A.¹, Fabregas, N.²

^{1.} Univ.de Bordeaux /CNRS UMR 5805 EPOC, Pessac France

^{2.} Department of Earth Science, University of Bergen, Bergen - Norway

Les dépressions sous-marines sont des structures communes sur le fond marin oriental des Bahamas, au pied du plus haut escarpement connu sur terre, le Blake Bahama Escarpment (BBE). Elles forment des structures légèrement allongées, parmi les plus grandes de la planète. Une reconnaissance automatique montre qu'elles ont une largeur supérieure à 1000 m et une profondeur parfois supérieure à 200 m. Elles dépassent ainsi en taille les structures sous-marines d'échappement de fluides ou les structures liées à la dissolution (dolines, tiankeng) ou à l'érosion purement mécanique (plunge-pools). Ces dépressions peuvent être soit isolées soit coalescentes. Les plus grandes se trouvent à l'embouchure des vallées sous-marines et des canyons et sont suivies d'un haut topographique interprété comme un dépôt délié à un ressaut hydraulique (sbp). Ils traduisent le passage d'écoulements gravitaires au niveau de ces dépressions. Les courants de turbidité dans le système de canyons carbonatés sont épisodiques et préférentiellement déclenchés lorsque la plate-forme carbonatée est inondée. Par conséquent, le gigantisme de ces dépressions ne peut pas être expliqué par un mécanisme similaire à celui des plunge pools. L'énergie mécanique nécessaire pour former de telles structures est largement trop élevée par rapport à celle développée par les écoulements gravitaires qui empruntent les vallées sous-marines. Néanmoins, la présence de dépôts en aval des dépressions suggère que les écoulements rafraichiraient des structures de dissolution préexistantes. Aux Bahamas, ces structures résultent de dissolution karstique. Ces dolines seraient formées par la dissolution des carbonates sous l'action de saumures constitués de sulfures résultant de la dissolution de sulfates (ex. anhydrite) présents dans la colonne sédimentaire de la plate-forme. Le mouvement de ces sulfates serait initié et maintenu par le flux de chaleur géothermique en base de plate-forme. Ces fluides circuleraient le long d'accidents tectoniques, notamment les zones de fractures associées aux paléo-transformantes et expliquerait l'alignement de certaines de ces dépressions dans l'axe de l'embouchure des canyons. Ainsi, les dépressions géantes observées à cet endroit aux Bahamas sont le résultat combiné d'une phase initiale de dissolution liée au retrait du BBE (doline) et à l'activité plus récente d'écoulement chargé de sédiments (plunge pool).

Mots-Clés : Carbonates, doline, dissolution, plunge pool, Bahamas, écoulement sous-marin



Modèle de minéralisation et diagenèse des tapis microbiens stromatolithiques hypersalins en domaine marin restreint, comparaison avec les microbialithes anciens.

Aurélien Pace^{*1,2}, Raphaël Bourillot², Emmanuelle Vennin³, Anthony Bouton³,
Christophe Dupraz⁴, Olivier Braissant⁵, Thibault Duteil², Irina Bundelleva³, Patricia
Patrier⁶, Pierre Sansjofre⁷, Yusuke Yokoyama⁸, Pieter Visscher^{3,9}

¹Laboratoire Littoral Environnement et Sociétés (LIENSs) – UMR 7266 - France ²EA 4592, Géoressources & Environnement, Bordeaux INP - France ³Laboratoire Biogéosciences – UMR 6282 - France

⁴Department of Geological Sciences, Stockholm University - Suède ⁵Center of Biomechanics and Biocalorimetry, University of Basel - Suisse ⁶UMR 7285 – IC2MP - Université de Poitiers – France

⁷Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie – UMR 7590 - France

⁸Department of Earth and Planetary Sciences, Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo - Japon

⁹Département of Marine Sciences, University of Connecticut - USA

Les tapis microbiens et les microbialithes (résultant de la minéralisation de tapis microbiens) sont des dépôts organosédimentaires benthiques constitués de plusieurs populations de micro-organismes, de matrice organique, de précipitation minérale et/ou de grains piégés. Les formes les plus anciennes, âgées d'environ 3,5 Ga, sont les premiers écosystèmes connus sur Terre. Les microbialithes forment donc une archive sédimentaire unique par l'enregistrement de périodes clés de l'histoire géologique de la Terre.

Ces faciès microbiens ont colonisé une grande partie des environnements terrestres y compris extrêmes comme les environnements hypersalins. Les processus microbiens menant à la précipitation de carbonate dans les tapis microbiens hypersalins sont bien documentés (notamment aux Bahamas). En revanche, le devenir et la préservation de ces phases minérales et leur évolution morphologique pendant la diagenèse précoce (i.e., les premiers siècles à millénaires suivant le dépôt) sont encore mal connus.

Ce travail vise à étudier et analyser les produits minéraux, les processus de précipitation et la chronologie de la minéralisation dans les tapis microbiens stromatolithiques modernes et les microbialithes holocènes d'une lagune hypersalée à alimentation marine située à Cayo Coco (Cuba), afin d'établir un modèle de minéralisation et de confronter ces résultats à des microbialithes (ex : Messinien du Bassin de Sorbas, Espagne). Des analyses minéralogiques, microscopiques, biochimiques et géochimiques ont permis de mettre en évidence quatre phases minérales précipitant au sein du tapis et quatre microfabriques microbiennes. Les paragenèses de ces minéraux et la distribution verticale des microfabriques seront étudiées pour déterminer l'influence relative des paramètres physico-chimiques et microbiens sur la minéralisation des tapis. Cette étude permettra une meilleure compréhension et interprétation de la mise en place des tapis microbiens dans le registre fossile.

Mots-Clés : Tapis microbiens, stromatolithes, diagenèse, précipitation carbonatée



Vers une approche dynamique des séquences récifales

Anne-Morwenn Pastier^{*1}, Luca Malatesta¹, Kim Huppert¹, Denovan Chauveau²,
Gino deGelder³, Laurent Husson³, , Christine Authemayou², Kevin Podoja⁴

¹ GFZ Potsdam, Helmholtz Institute, Allemagne

² LGO, IUEM, UMR6143, Université de Bretagne occidentale,
France
³ ISTERRE, UMR5275, Université Grenoble Alpes,
France

⁴ M2C, UMR6143, Université de Caen Normandie, France

Les séquences de terrasses coralliennes résultent des interactions entre la production de sédiments biogéniques et clastiques, les variations du niveau marin, l'érosion par les vagues et la déformation verticale. Elles sont d'excellents marqueurs pour les reconstitutions tectoniques et eustatiques, mais leur apport est généralement limité à une approche bijective, associant des valeurs uniques d'âge et d'élévation d'une terrasse à un unique maximum eustatique, ou déplacement cosismique, et réciproquement. L'augmentation des données disponibles, datations et topographie haute résolution, a révélé de nombreuses exceptions à l'approche bijective : coraux de plusieurs stades isotopiques marins (MIS) sur une même terrasse, coraux d'un même MIS sur plusieurs terrasses, absence d'un MIS dans une séquence.

Afin de mieux comprendre les contrôles majeurs régissant la morphologie de ces séquences, nous avons développé un modèle numérique simulant la morpho-stratigraphie des séquences récifales, simple et open-source. Il intègre la croissance récifale, l'érosion par les vagues, le dépôt des sédiments clastiques, les variations du niveau marin et la déformation verticale. Les interactions entre ces processus permettent d'expliquer les exceptions à l'approche bijective.

La séquence récifale du Cap Laundi, Sumba, Indonésie, montre ces exceptions, avec notamment des coraux datés du MIS 5e sur trois différentes terrasses. Une approche dynamique, embrassant la continuité des variations du niveau marin, permet d'expliquer cette morphologie. Le faible taux de croissance récifale ne permet ni le maintien du récif au niveau marin ni la saturation de l'espace disponible lors de la transgression, laissant une terrasse noyée alors qu'un nouveau récif se développe, marquant le maximum eustatique du MIS 5e. La terrasse noyée est réoccupée par le récif lors de la régression, formant ainsi deux terrasses au cours d'un seul cycle eustatique, dont l'une n'indique aucune stagnation du niveau marin.

Mots-Clés : Récifs coralliens, modélisation numérique, variations eustatiques, tectonique, MIS 5e



Carbonate cementation of ash beds in marine source rocks: example of the Vaca Muerta Fm (Argentina)

Philippine Rutman ^{1,2}, Guilhem Hoareau^{*1}, Jean-Michel Kluska ², Alain Lejay ², François Gelin ², Charles Aubourg ¹, Eider Hernandez Bilbao ^{1,2}

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour - E2S UPPA, CNRS, TOTAL, LFCR, UMR5150 - Pau - France

² TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Fégier (CSTJF) – TOTAL – France

As many other petroleum source rocks in the world, the marine Vaca Muerta Fm (Tithonian- Valanginian, Neuquén basin, Argentina) contains numerous centimeter-thick ash beds (up to 4 per meter). These beds play an important role in the propagation of hydraulic fractures in unconventional oil/gas shale production, and may influence fluid migration during early primary oil migration. Based on mineralogical and geochemical analysis on samples from cores and outcrops (optical and SEM microscopy, μ XRF mapping, Qemscan, XRD and SIMS), two main families of ash beds of calco-alkaline parentage have been recognized. The first family, the clay-rich ashes, is characterized by a matrix made of an illitized volcanic glass, with mainly albite phenocrysts locally altered into calcite. The second family, the calcite cemented ashes, is characterized by argillitized glass shards, pumice fragments and vesicle particles associated with mineral fragments, supported by a calcite matrix making 50 to 75% of the rock. Calcite-cemented ashes, which can be classified as diagenetic carbonates, commonly overlie the clay ashes, pointing to related events of volcanic ash emission but distinct diagenetic evolution. In the calcite-cemented ashes, petrographic observations clearly show that matrix carbonates precipitated early, before compaction. Accordingly, the variably negative $\delta^{13}\text{C}$ values of the calcite matrix obtained by SIMS (~ 0 to -20‰) could be explained by early precipitation in marine porewaters variably affected by microbial sulfate reduction. In contrast, the low $\delta^{18}\text{O}$ values (-5 to -20‰) are not expected in near-surface marine conditions, but could point to variable isotopic reequilibration during subsequent burial. Alternatively, both isotopic trends may result from isotopic exchange with the ash beds. These observations show that early marine diagenesis of argillaceous source rocks can be strongly influenced by small scale lithological variations, up to forming secondary diagenetic carbonate layers with distinct mechanical and petrophysical properties.

Mots-Clés : Source rocks, ash beds, diagenesis, calcite, carbonates, cementation, sulfate reduction



T11.8 Sédimentologie des silicoclastiques



Etude sédimentologique et biostratigraphique de la formation grés-marneuse du bassin de Tizi Ouzou (Algérie)

Abizar Jugurta ^{*1}, Ahmed Zaid Iddir ², Defaflia Nabil ³

¹ Laboratoire des environnements sédimentaires - université Larbi Tebessi de Tébessa – Algérie

² Laboratoire des eaux – université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou - Algérie

³ Laboratoire des environnements sédimentaires – université Larbi Tebessi de Tébessa – Algérie

Le bassin de Tizi Ouzou s'est formé au Miocène en contexte post-collision (orogénèse alpine).

Son substratum évolue d'un socle cristallin dans sa partie Sud à un substratum sédimentaire de flyschs nord-kabyles dans sa partie Nord. Epaisse d'environ 1 000 m, sa couverture sédimentaire englobe trois formations : une formation grés-conglomératique à la base, une formation marno-gréseuse et une formation marneuse.

La coupe réalisée à Timizart, en périphérie Nord du bassin, montre la formation grés-marneuse reposant en discontinuité sédimentaire sur la formation grés-conglomératique. La séquence inclut des marnes (5 m) et une dalle de grès (50 cm).

Silteuses à la base de la formation, les marnes deviennent de plus en plus propres vers le sommet avec intercalation de lits de tempestites.

La dalle de grès gît brusquement sur les marnes et montre : stratifications planes à obliques, rides de vagues, traces de terriers, bird eyes et structures de tectonique synsédimentaire.

La configuration en marnes/grès traduit une oscillation cyclique du niveau marin peu profond, un hydrodynamisme calme influencé par des épisodes de tempêtes, encadrée par une tectonique active.

Cette formation finit avec un grès massif de 10 m, à surface durcie, ferrugineuse, avec des rides de vagues et traces de terriers indiquant une discontinuité sédimentaire.

Les marnes renferment une faune variée dont l'identification des foraminifères planctoniques exhibe des *Globigerinoides bispéricus*, *Praeorbulina transitoria*, *P. glomerosa*, *P. curva* indiquant la zone N8 de Blow attribuée au Burdigalien inférieur. La présence de *Orbulina universa* dans les échantillons prélevés sur la discontinuité marque le passage vers la zone N9 de Blow.

Mots-Clés : sédimentologie, environnements de dépôt, foraminifères planctoniques, biozone, Burdigalien, bassin de Tizi Ouzou.



Shelf-derived mass-transport deposits: origin and significance in the stratigraphic development of trench-slope basins, active Hikurangi margin, New Zealand

Barbara Claussmann ^{*1,2}, Julien Bailleul ¹, Frank Chanier ³, Geoffroy Mahieux ⁴,
Vincent Caron ⁴, Adam McArthur ⁵, Corentin Chaptal ¹, Hugh Morgans ⁶, Bruno
Vendeville ³

¹ Basins-Reservoirs-Resources (B2R U2R 7511), UniLaSalle-University of Picardie Jules Verne - France

² Schlumberger, Software Integrated Solutions - United Kingdom

³ University of Lille, CNRS, ULCO, UMR 8187, Laboratory of Oceanology and Geosciences (LOG) - France

⁴ Basins-Reservoirs-Resources (B2R U2R 7511), University of Picardie Jules Verne-UniLaSalle - France

⁵ School of Earth and Environment, University of Leeds - United Kingdom

⁶ GNS Science, Lower Hutt - New Zealand

Continental shelves supply some of the greatest mass-wasting events recorded worldwide. Sea-level variations and high sedimentation rates are commonly inferred to be the main causal mechanisms, thereby underestimating the role of tectonics in triggering slope destabilization, downslope mass-movement and deposition of the associated shelf-derived sediments into deep-water settings. Along active margins however, tectonics predominate and exert a crucial control on the stratigraphic development of the related confined intra-slope basins (e.g., trench-slope basins). In this context, we developed an original approach using a combination of photogrammetry, traditional fieldwork (e.g., detailed sedimentary sections) and taphonomic data to thoroughly map and characterize the Middle Miocene shelf-derived mass-transport deposits (MTDs) outcropping in the southern emerged portion of the Hikurangi subduction wedge (Whareama and Te Wharau basins, North Island of New Zealand). With these methods, our study brings high-resolution, outcrop-scale insights on the nature of the reworked sediments (e.g., lithofacies), the modalities of development and emplacement (i.e., pre-conditioning factors and causal mechanisms) and the related depositional environments. Results show that periods of repeated regional tectonic activity (shortening, uplift, related seismicity) in such compressional settings not only affect and control the emplacement of shelfal environments but also drive the recurrent generation and destruction of oversteepened slopes, which in turn, favour the destabilization and collapses of the shelves and their substratum. Here, these events produced both large- and small-scale shelf-derived sediment mass-failures and debris flows, which eventually broke down into a series of coalescing, erosive, genetically-linked surging flows downslope. The associated MTDs have a regional footprint, being deposited across several trench-slope basins. Recognition of tectonic activity as another causal mechanism for shelf failure (in addition to sea-level fluctuations, high-sedimentation fluxes) has implications for both stratigraphic predictions and understanding the tectonostratigraphic evolution of deep-marine fold and thrust belts.

Mots-Clés : active margin, tectonics, trench-slope basins, shelf-derived material, mass-transport deposits



Sequence stratigraphic evolution of the Kumano Basin, SW Japan

Pauline Cornard ^{*1}, Jasper Moernaut ¹, Gregory Moore ², Arata Kioka ³, Achim Kopf⁴, Christian dos Santos Ferreira ⁴, Michael Strasser ¹

¹ Department of Geology, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria

² Department of Geology and Geophysics, University of Hawaii, Honolulu, HI 96822, USA

³ Department of Earth Resources Engineering, Kyushu University, Fukuoka, Japan

⁴ MARUM – Center for Marine environment Sciences, University of Bremen, Bremen, Germany

Based on a combination of seismic datasets and IODP well data, we investigate the Pleistocene–Holocene deposits of the tectonically active Kumano upper forearc basin (UFB), Japan, to better understand the eustatic sea-level forcing on the sediment dynamics. During the last deglaciation, starting ~18,500 years ago, sea level variation was a primary control on the sediment dynamics in the basin. The lowstand stage is defined by debris- and mud-flow deposits, with the sediments accumulating in the deep basin. As sea level rose, there was an increase in sand supply, and the transgressive stage deposits are characterized by sandy turbidites. There was a progradation followed by a retrogradation of the sandy deposits. This was related to the increase in meltwater discharge from the Japanese Alps at the beginning of the transgression phase, followed by flooding of the shelf. There was a drastic reduction in supply of sandy material during the highstand stage, with most of them accumulating on the shelf.

In the deeper and older deposits of the UFB, eight stratigraphic units are defined. The dominant stratigraphic pattern is controlled by 100-kyr Milankovitch eccentricity cycles indicating a strong eustatic control on the sediment supply over the last 400 kyr. The presence of para-sequences shows that the sediment dynamics result from the interaction between eustatic and tectonic controls. We propose different scenarios regarding the tectonic controls on the sediment dynamic, e.g., the implication of the subduction of the paleo-Zenisu ridge triggering accommodation space or the mud volcanism and related volcanoes acting as a natural barrier.

This study is one of the first to use sequence stratigraphic to deconvolve the tectonic from eustatic signals in the deposits of Kumano Basin, using a multidisciplinary approach. It attests that glacio-eustasy is one of the primary controls on the sediment supply and, therefore, on the basin morphodynamics despite the tectonic control.

Mots-Clés : Sequence stratigraphy, glacio-eustatic control, submarine-fan dynamic, forearc basin



Sedimentological and stratigraphic evolution of synrift silicoclastic shallow marine environments (Halten Terrace, Norwegian Sea, Middle Jurassic to Lower Cretaceous)

Romain Grime ^{*1, 2}, Bernard Pittet ¹, Sten Rasmussen ², Francesco Borraccini ³,
Sébastien Landru ⁴, Alexandre Bouche ⁵,

¹ Université de Lyon, UCBL, ENSL, CNRS, LGL-TPE, 69622 Villeurbanne – France

² Edison Norge AS, Jattavagveien 18 – Troll Building, 4065 Stavanger – Norvège

³ Edison International SpA – Foro Buonaparte 31, 20121 Milan – Italie

⁴ Austtunveien 40, 4032 Stavanger – Norvège

⁵ Emerson E&P Software, 1 rue Gramont, 75002 Paris – France

The terrigenous formations of passive margins are significant hydrocarbon reservoirs. They result in particular from synrift deposits in shallow environments alternating coastal and deltaic processes. These deposits are well represented on the Halten Terrace in the Norwegian Sea. However, the geometry of the sedimentary bodies, the spatial distribution and the continuity of the sandstones and conglomerates are poorly characterized for the southern part of the terrace, and the reservoirs remain difficult to model. To better constrain these formations and their architecture, we conducted a sedimentological and stratigraphic study using interpreted seismic data (3D seismic cube), logs, and detailed descriptions of sedimentary cores (~ 500m). We identified 11 sedimentary facies, showing an alternation between a wave-dominated coastal paleoenvironment and a subaqueous delta environment. We determined 7 stratigraphic sequences with their sequence boundaries (SB) and maximumflooding surfaces (mfs). We constrained their ages by biostratigraphy (dinocysts). In addition, we characterized a set of seismic horizons and key faults. Our results confirm that synrift environments are controlled as much by tectonic activity as by sea level variations and climate change. Relay ramps deliver sediments to coarse-grained deltas along major active faults. But in the case of minor or less active faults, wave-dominated coastal environments develop. Thereby, at the end of the rifting, sea level rise combined with aridification of the climate favour wave-dominated beach systems at the expense of deltas.

Mots-Clés : Coarse-grained deltas, biostratigraphy, sequence stratigraphy, rift-climax



Sources et transports des minéraux argileux le long de la pente continentale du Golfe de Cadix depuis le Pléistocène inférieur

Paul Moal-Darrigade^{a*}, Emmanuelle Ducassou^a, Viviane Bout-Roumazeilles^b,
Vincent Hanquiez^a, Marie-Claire Perello^a, Thierry Mulder^a, Jacques Giraudeau^a

^a Univ. Bordeaux, CNRS, EPOC, EPHE, UMR5805, F-33600 Pessac, France

^b Université Lille 1, Laboratoire Géosystèmes, UMR 8217 CNRS, France.

La sédimentation de la pente moyenne du Golfe de Cadix est fortement influencée par l'écoulement d'un courant de fond d'origine méditerranéenne : la *Mediterranean Outflow Water* (MOW). Depuis le début du Pliocène, ce courant s'écoule en direction du nord-ouest, générant un système contouritique complexe essentiellement organisé en drifts et chenaux. Les processus sédimentaires liés à l'activité de la MOW ont particulièrement été étudiés depuis une quarantaine d'années. Cependant, peu d'études se sont concentrées sur la nature et l'origine des particules fines alimentant ce système contouritique.

Lors de la mission océanographique CADISAR et de l'expédition IODP 339, des enregistrements sédimentaires ont été prélevés dans différents secteurs du système contouritique. Des mesures de granularité et de minéralogie des argiles ont été effectuées à haute résolution dans le but d'identifier les sources des argiles composant les différents corps sédimentaires. La composition minéralogique du cortège argileux démontre que les particules fines de la pente moyenne du Golfe de Cadix constituent un mélange entre les apports fluviaux terrigènes du Guadalquivir (smectite) et les apports éoliens et fluviaux nord-africains (kaolinite et chlorite). L'export puis le dépôt de ces minéraux argileux sont contrôlés par la circulation atmosphérique, la circulation océanique de surface et l'écoulement de la MOW. Les assemblages contrastés entre les sites situés sous les différentes branches de la MOW suggèrent un processus de ségrégation par taille et propriétés des minéraux argileux dans la direction de l'écoulement du courant. Au cours des derniers 25 ka, les variations du niveau marin et des circulations atmosphériques globales comme la position de la Zone de Convergence Intertropicale ont considérablement influencées la quantité d'argiles délivrées par les fleuves et la quantité de poussières éoliennes transportées par les vents alimentant le système contouritique. A une échelle de temps plus importante, les changements climatiques et notamment l'alternance des cycles glaciaires-interglaciaires ont modifiés les sources et les vecteurs de transport des minéraux argileux, impactant considérablement la sédimentation des particules fines du drift de Faro depuis le Pléistocène moyen.

Mots-Clés : Cortège argileux, Golfe de Cadix, *Mediterranean Outflow Water*, contourites, sources



Analyse faciologique, caractérisation des paléoenvironnements et stratigraphie séquentielle haute résolution des formations triasiques du bassin d'Imini (Haut-Atlas de Marrakech, Maroc)

S. Obad ¹, R. Essamoud ^{*1}, A. Afenzar ², A. Nguidi ¹

¹ Hassan II University of Casablanca (UH2C), Faculté des Sciences Ben M'Sik, Laboratoire de Dynamique des Bassins Sédimentaires et Corrélations Géologiques (LDBSCG) – Maroc

² Sidi Mohamed Ben Abdallah University, Faculté des Sciences Dhar El Mahraz- Maroc

Les dépôts continentaux présentent des faciès multiples et une architecture très variable, résultant de l'interaction de processus variés, contrôlés par la tectonique, le climat et l'eustatisme. Ici, nous présentons les faciès, les paléoenvironnements et la stratigraphie séquentielle du bassin triasique d'Imini, dans la zone subatlasique méridionale du Haut Atlas de Marrakech (80 km au nord d'Ouarzazate). Ce bassin s'est formé au cours du rift qui a réactivé les structures préexistantes du socle.

Les formations caractérisées datent du Trias moyen à supérieur. Il s'agit généralement de sédiments détritiques et évaporitiques, coiffés par des coulées basaltiques datées du Trias supérieur-Lias inférieur. Les affleurements forment une couverture déposée en discordance sur des schistes cambro-ordoviciens du socle.

L'analyse sédimentologique détaillée a permis la caractérisation, de la base au sommet de la série, de treize types de faciès : Conglomératiques (Gf1, Gf2, Gf3, Gf4, Gf5) correspondant respectivement aux faciès Gmm, Gcm, Gh, Gt, Gp de Miall (1985), gréseux (Sf1, Sf2, Sf3, Sf4, et Sf5) correspondant respectivement aux faciès Sm, St, Sp, Sr, Sh de Miall (1985) avec un sixième faciès Sf6 bioturbé, et deux faciès fins (Ff1 et Ff2) correspondant aux faciès Fl et Fm de Miall (1985) ainsi qu'un faciès évaporitique Ef.

L'association des faciès caractérise six éléments architecturaux (EA1 à EA6) correspondant à ceux de Miall (1985, 2006) : CH (channels), GB (Gravel bars and bedforms), SB (Sandy bedforms), SG (Sediment gravity flows), LS (Laminated sand sheet) et FF (Overbank fines).

Les paléoenvironnements évoluent d'un milieu proximal caractérisé par des cônes alluviaux, à un milieu fluviatile en tresse puis à un milieu fluviatile distal avec généralement des plaines alluviales associées à des playa lakes.

La stratigraphie séquentielle haute résolution met en évidence 26 unités génétiques continentales. Celles-ci sont englobées dans 3 groupements d'unités génétiques correspondant à trois cycles mineurs de progradation-rétrogradation, eux-mêmes groupés dans un cycle majeur corrélé à l'échelle du Haut-Atlas sud. Ces cycles sont manifestement liés à la variation du niveau de base. La dominance des phases de rétrogradation donnant une allure asymétrique aux cycles est liée à la prédominance des phases de montée du niveau de base.

Mots-Clés : Trias, Sédimentologie, Stratigraphie séquentielle haute résolution, Imini, Maroc



Sequence stratigraphic evaluation and seismic character of Early - Middle Miocene marine sediment deposits on the North West Java Basin, Indonesia.

Nanda Natasia ^{*1}, Damien Do Couto ¹, Fadi Nader ²

¹ Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP) – CNRS : UMR7193, Sorbonne Université

² Direction des Sciences de la Terre et technologies de l'environnement, IFP Energies nouvelles

The North West Java Basin (NWJB) is an important basin in Indonesia, in terms of potential hydrocarbon exploration. Indonesian government report that a considerable exploration potential is suggested, and new discoveries will most likely be achieved in this basin, in the near future. This study concerns one the major targets for future exploration, and focuses on the organization of the mixed siliciclastic and carbonate succession of the Early-Middle Miocene Upper Cibulakan Formation (UCF) as one of the main production interval on the NWJB in term of sequence stratigraphic frameworks.

The NWJB is tectonically dominated by North-South trending normal fault. Some basement high and low area are observed in the seismic section as the product of rifting tectonic during Late Eocene – Late Oligocene. The thickness of the sedimentary rocks that fills in the lowest part of the basin may exceeds 3800 m (12.500 ft) as shown in the well sections. Lower part of UCF comprises approximately 600 meter of interbedded sandstones, siltstone, shales with several limestone bed. Regional evidence suggests the sediments are shelfal/deltaic in origin, and were deposited during Early Miocene times where a series of delta lobes prograded southward. Seismic interpretation of Lower UCF shows a significant difference in thickness between the hanging wall and footwall portions of the bounded fault. The sediments seems to cover the existing low topography and onlap towards the high. This indicates that the existing faults were active and play an important role in distributing sediment in the Lower UCF. The upper part of UCF consists of intercalated sandstone, siltstone, and shale with several carbonate build up bodies developed in structurally selective areas at two stratigraphic level. These carbonates are not widespread but occur as isolated build up that grade laterally into deeper marine silts and muds with limestone stringers.

Detailed sequence stratigraphic observation within this interval reveal two main sequences and highlight the distribution of the reservoir units for further exploration.

Keywords : Cibulakan Formation, Northwest Java, sequence stratigraphic, seismic characteristics.



T11.9 Processus diagénétiques



Transformations du soufre lors de la diagenèse précoce : une approche taphonomique expérimentale

Giliane P. Odin ^{*, 1,2,3}, Thanh Thuy Nguyen Tu ¹, Sylvie Derenne ¹, Sylvain Charbonnier ²

¹ METIS – Sorbonne Université, CNRS, EPHE, Faculté des Sciences et d'ingénierie – France

² CR2P – Sorbonne Université, MNHN, CNRS, Muséum national d'Histoire naturelle – France

³ Adresse actuelle : LGE – Univ. Gustave Eiffel – France

Si les fossiles permettent d'évaluer la biodiversité passée de la Terre, l'étude des transformations physico-bio-géochimiques ayant lieu entre la mort d'un organisme et sa conservation en collections est nécessaire pour mieux comprendre l'origine, les biais et l'état du registre fossile actuel. Le soufre est un élément particulièrement intéressant pour la fossilisation car il peut être impliqué dans la préservation d'organismes via deux mécanismes

: un d'origine organique (la sulfuration) et un d'origine minérale (la pyritisation). La sulfuration permet d'augmenter le potentiel de préservation des molécules, via l'incorporation de soufre dans la matière organique de l'organisme. La pyritisation, elle, permet sa réplique en pyrite (FeS_2), et ce à une échelle micrométrique. Cependant, les mécanismes, cinétiques et contrôles de ces réactions – basés sur l'étude du registre fossile – ne sont que partiellement compris et connus. Nous avons donc expérimentalement dégradé des crustacés (*Palaemon serratus*) dans des microcosmes constitués de sédiment marin et d'eau de mer, sous diverses conditions, pendant quatre mois. Grâce à la formation de molécules organiques soufrées et de cristaux de sulfures de fer au sein de certains microcosmes, ces expériences ont permis 1/ de mieux cerner l'action de quelques contrôles – sans effet pour la présence ponctuelle d'oxygène, d'effet négatif pour une matière organique dégradée ou limitante ; 2/ de préciser la cinétique de ces réactions – entre quelques dizaines de jours et deux mois selon la réaction considérée et 3/ de mieux identifier les molécules soufrées mises en jeu dans ces réactions. Ces résultats restent à être confrontés à des données issues des fossiles, par exemple sur l'habitus et la répartition des composés soufrés, afin de pouvoir obtenir un aperçu complet de ces mécanismes de fossilisation.

Mots-Clés : Soufre, fossilisation, pyrite, taphonomie expérimentale, diagenèse, sulfuration



La glauconite de la craie cénomaniennne du Cap Blanc Nez (Boulonnais, France) : un piège à germanium et un indicateur paléoenvironnemental

Nicolas Tribovillard ^{*1}, Viviane Roumazeilles ¹, Oussenatou Nzie Moundom ¹,
Marion Delattre ¹, Sandra Ventalon ¹, Romain Abraham ¹

¹ Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – CNRS-Univ-Lille-ULCO : UMR8187, Université de Lille – 59000 Lille - France

Le rivage de part et d'autre du Cap Blanc Nez (côtes de la Manche, France) montre des falaises de craie d'âge compris entre le Cénomanien et le Santonien. Les faciès de la base du Cénomanien sont très riches en glauconie et dépourvus de nodules de silex. Glauconie et silex sont d'origine authigénique et demandent la mobilisation d'éléments chimiques pour leur croissance : Si pour les deux minéraux, Fe et K pour les glauconies. Si l'on sait déjà grâce à la géochimie élémentaire (rapport Ge/Si) que la silice des silex tire son origine de la dissolution des éponges de la craie, en est-il de même pour la glauconie ? Cette question n'a de sens que si la glauconie est autochtone et synsédimentaire, et non pas remaniée lors de la transgression cénomaniennne. De plus, nous avons voulu savoir si l'étude de la teneur en éléments traces de la glauconie (approche inédite à notre connaissance) pouvait renseigner sur les conditions de l'authigénèse dans les craies glauconieuses.

Nous avons examiné le contenu argileux des craies de la base du Cénomanien et nous avons extrait les minéraux verts de la roche pour étudier leur morphologie, minéralogie, géochimie (majeurs & traces) et granulométrie. Les craies sont constituées de carbonate de calcium, de smectite et de glauconite vraie, sous forme de pellets, avec parfois de rares traces de quartz et quelques graviers (infra-) centimétriques phosphatés. Le classement granulométrique des glauconites est variable d'un échantillon à l'autre et toujours mauvais, ce qui milite en faveur d'une origine autochtone et non pas remaniée de ces minéraux. Cette origine est aussi suggérée par la quasi-absence de minéraux terrigéniques, hormis de la smectite connue pour son potentiel de large répartition en milieu marin. La géochimie des échantillons montre une composition très homogène en éléments majeurs, avec une teneur en K₂O supérieur à 8%. Cela permet de classer ces glauconites comme étant très évoluées, ce qui indique un long temps de formation authigénique (> 100 ka) et donc un taux de sédimentation extrêmement réduit. Les glauconites sont très riches en germanium, ce qui empêche d'identifier une source de silice (à la différence de ce qui est possible avec les silex). On ne peut donc pas affirmer que la silice soit issue de la dissolution des éponges mais cet enrichissement en Ge, couplé à celui en vanadium et à l'absence d'enrichissement en molybdène, indique un milieu de dépôt légèrement réducteur (*suboxic*). De telles conditions sont compatibles avec l'état redox du fer incorporé dans les glauconites. On peut enfin formuler l'hypothèse que la présence de précurseurs argileux ferrifères (smectite) ait entraîné la néogénèse de glauconite ; la disparition des minéraux argileux vers le haut de la formation aurait abouti à ce que la silice dissoute disponible ait entraîné l'apparition, non plus de minéraux verts, mais de silex.

Mots-Clés : Craie glauconieuse, Crétacé supérieur, conditions redox, éléments traces métalliques,



taux desédimentation

La pyrite du Jurassique supérieur du Boulonnais (France), un piège à matière organique bactérienne insoupçonné

Nicolas Tribouvillard ^{*1}, Viviane Roumazeilles ¹, Abderrahmane Bensadok ¹,
MarionDelattre ¹, Sandra Ventalon ¹, Romain Abraham ¹

¹ Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – CNRS-Univ-Lille-ULCO : UMR8187, Université de Lille – 59000 Lille - France

La formation des Bancs Jumeaux se présente comme une succession de bancs calcaires et d'interbancs marneux, d'âge jurassique terminal (Tithonien) apparaissant à l'affleurement dans les falaises du Boulonnais. Cette formation est enrichie en pyrite présente en abondance sous des formes variées de framboïdes, polyframboïdes et autres concrétions de taille relativement importante pour de la pyrite sédimentaire (quelques dizaines à centaines de micromètres). Des travaux antérieurs ont montré que les polyframboïdes seraient apparus précocement au cours de l'authigenèse dans des microenvironnements réducteurs au sein de sédiments simplement dysoxygènes. La question est de savoir si, à l'instar de ce qui est observé pour des bactéries provoquant la minéralisation en carbonate de leur paroi externe, des bactéries sulfato-réductrices pourraient avoir été piégées (enfermées) dans des "sarcophages" de pyrite, induite par leur propre métabolisme.

Pour tenter d'apporter des réponses, les pyrites de grandes tailles ont été isolées des marnes des Bancs Jumeaux par des séparations physiques et des attaques acides. Leur analyse révèle la présence de matière organique dans des quantités non négligeables. La morphologie typique de certains polyframboïdes très représentés dans les échantillons étudiés suggère la fossilisation précoce de colonies bactériennes par de la pyrite. La pyrite est-elle un piège à molécules organiques identifiables ?

Mots-Clés : pyrite, Tithonien, conditions redox, éléments traces métalliques, sulfato-réduction, bactéries



T11.10 La crise du Messinien : modalités et conséquences



New event records highlighted in the Messinian post gypsum deposits from the Southern Dahra edge (NW Algeria)

Mohamed Kamel Osman ⁽¹⁾, Asma Atik ⁽¹⁾, Mostefa Bessedik ^{(1)*}, Lahcene Belkebir ⁽¹⁾, Mohamed El Habib Mansouri (1), Jean-Loup Rubino (2)

⁽¹⁾Laboratoire de Paléontologie Stratigraphique et Paléoenvironnement, Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers, Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, Oran (Algérie). ⁽²⁾TOTAL, TG/ISS, CSTTF, Avenue Laribeau, Pau (France).

Studied sections located in the Dahra massif (NW Algeria) allow to identify a new stratigraphic series, starting with gypsum, followed by Messinian lacustrine deposits and transgressive blue marls Pliocene in age.

Beneath the selenite gypsum, the deposits revealed *Globorotalia mediterranea*, *Amaurolithus primus* associated with *A. delicatus* and *A. amplificus* indicating a Messinian age (N17/NN11c). Gypsums capped by white micritic limestones are together, correlated with the "TCC" of West Mediterranean coral reef platforms (Cornée *et al.*, 2004; Roveri *et al.*, 2020). These correlations lead to estimate, for the Dahra Gypsum, an age ranging from 5.971 (base) to 5.60 Ma (top) (Clauzon *et al.*, 2015). It would correspond to a peripheral basin sedimentation, followed by desiccation and a reflooding. Consequently, the lacustrine/lagoonal deposits of the Dahra Massif, classified as Lago Mare despite the absence of Paratethysian elements, correspond to the Lago Mare 1 episode, of age slightly earlier than

5.60 Ma, comparable to those of Vera and San Miguel de Salinas (Spain). They occupy a large extension, both on the southern margin of the Dahra and on the northern slopes of the Beni Chougrane. In addition, the unconformable conglomerate deposits seems to start a Messinian episode, probably corresponding to an erosion phase (MES?) because they are overlain by Pliocene deposits, with *G. punctulata* in the Oued Tarhia section and *Globorotalia margaritae* in the Sahaouria one.

The blue marls show several bio-events, notably the occurrence of *Sphaerodinellopsis subdehiscens*, *Globorotalia margaritae*, *Ceratolithus acutus*, *Reticulofenestra zancleana*, followed by *G. punctulata*, *G. bononiensis*, *G. aff. crassaformis* and *C. rugosus*, *Helicosphaera sellii*, *Discoaster asymmetricus*, and *D. tamalis*. These biomarkers indicate an age ranging (Mazzola, 1971; Belkebir and Anglada, 1985; Martini, 1971; Backman *et al.*, 2012) from the base of the Zanclean to the Lower Piacenzian (N18 *p.p.*, N19 and N20 *p.p.* - NN12 *p.p.*, NN13, NN14 / NN15 and NN16) (Hilgen *et al.*, 2012). So, the pre-Pliocene paleotopography areas appear to be irregular probably linked to the regional tectonic context, generated by the Messinian Salinity Crisis. Therefore, the setting of Pliocene marine deposits seals a tectonic phase dated of Terminal Messinian age. This affects gypsum and Lago Mare deposits of the Dahra Massif. It has also resulted from a gravitational tectonic, responsible of the "olistolite" sedimentation setting, incorporated within the geological series. This deformation (in compression) seems to be far-reaching, corresponding to a restructuring of paleogeographical spaces associated with the littoral Tellian Chain uplift (Rouchy *et al.*, 2007; Rubino *et al.*, 2010), which may be contemporaneous (*p.p.*) with the evaporite deposits (brines) in the central Mediterranean basins, preceding the Pliocene marine reflooding in the region.

Key-words : Gypsum, Lago Mare, Messinian, Pliocene bioevents, tectonics.



Late Messinian salt deformation and erosional Surface: Impact of the associated uplift on the emersion of the Northern Levant basin, offshore Lebanon?

Benoît Didier ^{1*}, Marwa Shmeis ², Jean-Loup Rubino³, Christian Gorini⁴, Alexis Capron¹ et Carlo Cazzola ¹

¹ TOTAL SA, Division Exploration, Zone MENA, Paris la Défense, France

² ENSG – Nancy, France

³ TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – France

⁴ Institut des Sciences de la Terre de Paris, Sorbonne Université, France

A truncation surface at the top of the Messinian evaporite in the Levant Basin was identified by many authors (e.g.: Bertoni and Cartwright 2007, Feng et al; 2016, Kartveit et al. 2018 and 2019). It is clear that this surface (M horizon, IMTS or IES depending on the authors) post- dates a strong gravity salt deformation, especially in the Northern Levant basin, and is covered by the late Messinian Nahr Menashe Fluvial system, which developed on top of the salt in the Levant basin (Madof et al. 2019).

It is worth noting this deformation phase occurred at the end of the Messinian and has nothing to do with the “classical” gravity deformation of the Messinian salt, well documented at the front of the Nile delta, which is Pliocene-Quaternary in age and induced by the Pliocene sediment load.

This Pliocene gravity deformation is also recorded in the Levant basin, and the *Intra Messinian Erosional Surface* is folded during this Pliocene phase.

This presentation deals with the deformation phase which occurred prior the IMTS.

We show 1) it resulted in overturned and recumbent W to NW verging folds from the Levant margin to the East, up to the base of Eratosthenes sea mound to the West and Latakia ridge to the NW; 2) The reliefs created by these folds were almost removed by the following erosion (IES), however they likely influenced the location of the Nahr Menashe meandering belts which developed on top of the IMTS.

The salt most likely moved westwards under its own weight. Its movement was probably triggered by an uplift and tilting of the basin, even slight.

Therefore, the present-day thickness of salt is larger than the initial salt deposit, even if part of it was removed by subsequent erosion.

The uplift and tilting of the basin together with the thickening of the salt should be considered when we try to evaluate the amount of eustatic sea level fall in the basin at the end of the MSC. It is however difficult to decipher the respective role of each parameter, eustasy, salt thickening and tectonic uplift.

Mots-Clés : Mediterranean Sea, Salinity Crisis, Eastern Mediterranean Sea, Levant basin, Intra Messinian Erosional Surface, Salt gravity deformation



Le surcreusement messinien à Lyon : tracé, amplitude, et remplissage

Gilles Dromart ^{*1}, Jean-Pierre Suc ², Speranta-Maria Popescu ³, Emmanuel Egal ⁴, Lucie Perino ⁵, Jean-Loup Rubino ⁶, Philippe Sorrel ⁷

¹ Univ Lyon, LGT-TPE, 69364 Lyon – France

² Sorbonne Université, Institut des Sciences de la Terre Paris, 75005 Paris - France

³ GeoBioStratData Consulting SA, 69140 Rillieux-La-Pape - France

⁴ Egis Tunnels, 74373 Pringy – France

⁵ ENSG, 54505 Vandoeuvre-Lès-Nancy - France

⁶ Total SA - Centre Scientifique et Technique Jean Féger (CSTJF), 64000 Pau – France

⁷ Univ Lyon, LGT-TPE, 69622 Villeurbanne – France

Les conclusions de nos travaux emanent de la collecte et révision stratigraphique des données de quelques mille sondages « profonds » situés entre les villes de Anse au nord et de Givors au sud de Lyon, sondages dont les premiers furent réalisés dès 1846 sur la colline de St- Irénée. En raison du cadre géologique « récents » (5 à 2 Ma) et du contexte géodynamique régional actuel (très faible activité sismique) dans lesquels nous intervenons, nous considérons que les mouvements tectoniques autres qu'épiorogéniques ne sont pas opérants. Cette hypothèse permet des corrélations stratigraphiques par niveaux d'altitude actuelle des couches sédimentaires. L'identification à Oullins du Pliocène marin par la Palynologie s'accorde avec les données biostratigraphiques anciennes disponibles au sud du secteur étudié dans la vallée du Garon (e.g. Ballesio et al. 1981). Cette cohérence valide l'hypothèse sur l'absence de mouvements tectoniques différentiels significatifs.

Nos travaux confirment le passage par l'ouest de la métropole de Lyon de l'incision fluviale messinienne, hypothèse proposée par Mandier (1984). La vallée y incise les cailloutis du Tortonien et le socle hercynien sur une hauteur d'environ 320 m. La cartographie des isolithes à la cote NGF de 140 m précise le tracé du thalweg principal. Elle révèle l'existence de plateaux bordiers incisés par un canyon d'une largeur de 500 m, pour une profondeur de 150 m. Sont mis également en évidence le développement d'un important réseau de tributaires et la persistance d'îlots résiduels de socle au sein des vallées. La zone de confluence de la paléo-Saône avec le paléo-Rhône n'a pu être identifiée. Trois secteurs sont possibles, du Nord au Sud : Trévoux, Caluire, port fluvial de Lyon.

Les interprétations sédimentologiques suggèrent une extension des faciès margino-littoraux de la ria pliocène jusqu'au nord de Lyon. Une coupe stratigraphique le long du remplissage de la vallée permet le raccordement temporel des formations fluvio-lacustres de la Bresse aux formations de la ria rhodanienne. L'altitude actuelle des ennoissements marins de la ria suggère par ailleurs que l'ensemble du secteur étudié a fait l'objet d'un soulèvement d'environ 120 m depuis la transition Pliocène inférieur – supérieur (3,6 Ma).



Mots-Clés : Géologie urbaine, Lyon, Messinien, rias pliocène, lac bressan, paléoconfluence



Evaporites versus Deshydratites

Un scénario alternatif à la genèse des dépôts salifères géants?

Eric C. Gaucher^{*,1}, Sylvain Calassou¹, Alexandre Pichat^{2,1}

¹ TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – France

² Univ. Pau et des Pays de l'Adour – Pau – France

L'évaporation d'eau de mer est le processus "évident" proposé pour l'origine des grands dépôts salifères. Cependant d'aucun ont subi la difficulté d'appliquer partout ce processus dans les parties distales de marges. La marge africaine de l'atlantique sud montre notamment que le sel est pratiquement toujours positionné entre la fin du rift et la création de croûte océanique. Cet encadrement se fait dans des environnements de dépôt sédimentaires relativement profonds en domaine distal de marge. L'accumulation d'épaisseur parfois kilométrique de sel en contexte d'évaporation d'eau mer (seul réservoir communément considéré pour le CI) sera d'avantage favorisé par un environnement peu profond avec une connexion au domaine océanique très restreintes mais devant autoriser, sur le long terme, l'entrée d'immense quantité d'eau marine (il faut 65 km d'eau de mer pour former 1 km de sel). La présence de métaux (Zn, Pb), l'absence de sulfates ou l'existence de sels ultimes calciques hyper déliquescents (tachyhydrite) semblent également difficile à expliquer à partir d'une simple évaporation d'eau de mer sous des latitudes équatoriales où les précipitations sont quasi permanentes au cours des âges géologiques. C'est pourquoi des processus hydrothermaux encore mal contraints sont communément invoqués pour justifier l'existence de fluides salins exotiques.

En contexte hyperdistal d'une marge continentale, l'exhumation mantellique, les très forts gradients géothermiques, et l'activité volcanique peuvent être favorables à la génération de saumures et sels via deux modèles récemment développés. Il s'agit des modèles de changement de phase en chambre volcanique (Hovland et al, 2006) et des modèle de serpentinitisation (Scribano et al, 2017, Hovland et al, 2018). Dans le premier cas, le passage en phase critique de l'eau de mer (température supérieure à 374°C) permet la production d'une phase critique d'eau quasi pure et par conséquent de concentrer les ions dans une saumure. Dans le deuxième cas, la réaction de serpentinitisation consomme des quantités d'eau pure pour transformer olivine et pyroxène en serpentine (Debure et al., 2019). Les ions de l'eau de mer initiale se concentrent dans des saumures résiduelles. Nous avons appelé ces sels « deshydratites » car il faut consommer l'eau pure par des processus physico-chimiques pour les précipiter.

Hovland M. *et al.* 2006, Mar. Petrol. Geol. 23, 855-869 - Scribano V. *et al.*, 2017. Intern. J. of Earth Sciences 106, 2595-2608 - Hovland M. *et al.*, 2018, Mar. Petrol. Geol. 92, 987-1009 - Debure M., *et al.* 2019, Scientific Reports 9, 11720.

Mots-Clés : Sels, Evaporites, Deshydratites, Serpentinitisation, Etat critique de l'eau de mer.



Utilisation en néotectonique des marqueurs sédimentaires et morphologiques de la Crise messinienne

Jean-Claude Hippolyte ^{*1}, Jean-Pierre Suc ², Michel Dubar ³, Thomas Lebourg ⁴, Jean-Loup Rubino ⁵

¹ CEREGE, Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, Coll France - France
² Institut des Sciences de la Terre de Paris, Sorbonne Université, France
³ Cépam, Université Côte d'Azur, CNRS, Saint-Jean d'Angély
⁴ UMR GEOAZUR, Université Côte d'Azur - France
⁵ Total CSTJF, Pau - France

La Crise messinienne et sa cicatrisation se sont déroulées en plusieurs étapes depuis l'incision des cours d'eau jusqu'au remblaiement sédimentaire rapide et progradant de canyons en Gilbert deltas. G. Clauzon (1996) a pu définir quatre niveaux-repères morphologiques et stratigraphiques qu'il proposait d'utiliser pour quantifier les déformations tectoniques. Nous présenterons ces marqueurs (surface d'abandon pré-évaporitique, Surface d'érosion messinienne, transition marin-continental, surface d'abandon pliocène) ce qui nous permettra de souligner la variabilité des remplissages sédimentaires des canyons messiniens en fonction du contexte géographique. Des exemples de terrain dans le Sud-Est permettront d'illustrer la diversité des informations structurales qui peuvent être obtenues en combinant l'analyse de ces marqueurs avec des analyses structurales et cinématiques de failles.

Ainsi, la caractérisation géométrique des surfaces d'abandon et de la Surface d'érosion messinienne (thalwegs et flancs de canyons) permet-elle de quantifier des mouvements tectoniques verticaux et horizontaux. Dans la région de Digne, des segments de canyons messiniens ont été basculés, chevauchés ou tronqués par des failles. Les remplissages sédimentaires marins peuvent être utilisés comme paléo-altimètres et mettre en évidence l'évolution du littoral en réponse aux mouvements orogéniques. Les grès de la transition marin-continental ont un comportement cassant permettant l'expression des failles et fentes de tensions. Les galets des remplissages conglomératiques peuvent révéler des déformations tectoniques très faibles. Mais le long des failles ils peuvent être fracturés jusqu'à la cataclasite. La reconstruction de paléocontraintes permet de caractériser les déformations mais aussi de déterminer la paléo-horizontale de *foreset beds* inclinés et révéler des basculements tectoniques.

La combinaison de ces analyses permet de révéler et quantifier des déformations récentes à actives.

Mots-Clés : Messinien, tectonique, Alpes, Provence, Ligurie.



Evolution tectono sédimentaire Mio-pléistocène à Ibiza : conséquences de la crise de salinité

Lézin C.^a, Maillard A.^a, Odonne F.^a, Chanier F.^b, Gaullier V.^b and Guillaume D.^c

^aGéosciences Environnement Toulouse (GET), Université de Toulouse ; ^bLaboratoire d'Océanologie et de Géosciences, Univ. Littoral Côte d'Opale, Lille ; ^cUniv Lyon, UJM- SAINT-ETIENNE

Pour mieux contraindre la chronologie de la crise de Salinité messinienne (CSM) et apporter de nouvelles observations notamment sur la position stratigraphique de la surface d'érosion messinienne ainsi que des preuves de continentalisation, nous avons étudié la série Mio-pléistocène d'Ibiza. En effet, la proximité géographique de bassins périphériques bien documentés, situés dans le sud-est de l'Espagne, ainsi que l'existence de gypse messinien à Majorque, font d'Ibiza un lieu stratégique pour l'étude de la CSM.

La série messinienne d'Ibiza présente la particularité d'avoir une claire continuité latérale sur plusieurs dizaines de kilomètres enlevant toutes ambiguïtés sur la chronologie relative des différents événements qu'elle a pu enregistrer notamment au cours de l'intervalle Tortono-Pléistocène.

En comparaison avec la série équivalente de Majorque, nous avons pu identifier 5 unités lithologiques qui se succèdent au cours du temps. L'unité « récifale », d'âge principalement Tortonien, est composée essentiellement de faciès d'arrière-barre. Elle est surmontée par une unité détritique associée à des cônes alluviaux côtiers dans laquelle apparaissent les premiers microbialithes. Ces corps sédimentaires se sont mis en place sous l'influence de mouvements tectoniques extensifs. Ils sont eux-mêmes recouverts par un complexe carbonaté riches en oolithes et microbialithes (stromatolithes et thrombolithes) attribuées au Terminal Carbonate Complex (TCC) d'âge messinien à Majorque et sur de nombreux autres sites. Les argiles rouges sus-jacentes, fossilisant des paléosols, témoigne d'une phase de continentalisation à la limite Mio-pliocène. L'épisode régressif à l'origine de ce changement lithologique est attesté par une karstification et une érosion incisant les unités pré-crisis et façonnant des vallées reliées à des canyons sous-marins.

A Ibiza, cette phase de continentalisation est contemporaine de déstabilisations gravitaires. Des coulées boueuses d'extension kilométrique et une intense déformation souple du TCC s'observent sur la partie NE de l'île.

Ces intenses déformations syn-sédimentaires, observées pour la première fois à Terre, sont à relier aux énormes instabilités gravitaires enregistrées sur toutes les marges méditerranéennes pendant la vidange du bassin.

Cet épisode de déstabilisation du TCC est contemporain, et est à relier, à la remontée de fluides sous pression à l'origine de la précipitation de calcite et de nombreuses transformations diagénétiques dans les zones de déformation. Les mesures thermométriques et isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$) indiquent qu'il s'agissait de fluides météoriques chauds (250°C) qui ont probablement migrés le long des failles majeures orientées N70 à N110° visibles en amont des cônes alluviaux. Ces déformations et la surface d'érosion/karstification sont scellées par des calcarénites riches en gastéropodes, foraminifères benthiques (Miliolidae notamment) et fragments de Rhodophycées déposées en contexte littoral, datées du Pliocène par de rares foraminifères planctoniques, ou par des éolianites pléistocènes.

La série Mio-pléistocène d'Ibiza est un bon témoin des processus contemporains de la crise de salinité et nous permet de nous interroger quant à l'origine des instabilités gravitaires observées en particulier en offshore.

Mots-Clés : Ouest Méditerranée, Ibiza, Miocène-Pléistocène ; Crise de salinité messinienne, Instabilités gravitaires, continentalisation.



Le paradoxe de l'Ebre messinien

Romain Pellen¹, Daniel Aslanian¹, Marina Rabineau², Jean-Pierre Suc³,
Christian Gorini³, Estelle Leroux¹, Carmine Silenziario⁴, Speranta-Maria
Popescu⁵, Jean-Loup Rubino⁶

1, Laboratoire Géodynamique et enregistrement Sédimentaire, IFREMER, Plouzané, France. 2, Laboratoire Géoscience Océan, Université de Bretagne occidentale, Plouzané, France
3, Institut des Sciences de la Terre de Paris, Sorbonne Université, France. 4, Schlumberger Italiana SPA, Italy.
5, Geobiostratdata.consulting, Rillieux la Pape, France. 6, TOTAL, Pau, France.

Les seuils morphologiques conditionnent les échanges sédimentaires, aquatiques et fauniques entre les différents domaines. Ils constituent des facteurs cruciaux à prendre en compte dans l'évolution paléogéographique des sous-bassins durant la Crise de salinité messinienne (MSC - 5,97-5,46 Ma).

Nous nous concentrons ici sur le paradoxe de l'Ebre qui traite de la faible longueur inexpliquée à terre et sur la plateforme marine de l'Ebre messinien (<100 km) par rapport au Rhône messinien (~400 km) malgré des bassins versants actuels similaires.

La segmentation crustale et la subsidence différentielle par palier étudiée entre les domaines perché, intermédiaire et profond de Valence, Minorque et Liguro-Provençal (Pellen et al., 2016 ; Maillard et al., 2020), ont permis de mettre en lumière trois marches morphologiques (Km) contrôlant :

- le développement d'un système de vallées fluviales incisées long de plus de 270 km entre la chaîne catalane (Km1) et la zone de transition VB-MB (Km3) entre le bassin perché de Valence et le bassin intermédiaire de Minorque ;
- sous ces incisions, les dépôts détritiques associés se développant en rebord de plateau continental (Km2) et dans le domaine intermédiaire de MB (entre Km3 et Km4).

Notre étude favorise également une ouverture syn- ou pré-MSC du bassin (endoréique) de l'Ebre vers la Méditerranée. Un mécanisme d'érosion régressive localisé à des *knickpoints* successifs est proposé, évoluant avec de la chute du niveau marin messinien et permettant le développement du système complet de vallées incisées.

Le déplacement du couple Erosion-Dépôt est contrôlé par la morphologie et la segmentation par étapes pré-messinienne dans les bassins de Valence, Minorque et Ligurie-Provence. En comparaison, le système du Rhône est caractérisé (1) en position aval par une seule marche morphologique majeure (en rebord du plateau continental) (Bache et al., 2009) et une pente continentale plus raide ; (2) en amont par un palier pouvant être héritée de la phase 1 de la crise. Les deux cas mettent en évidence la relation entre cinématique, segmentation et morphologie, chute du niveau de base et couple érosion/sédimentation, bien exprimée lors de l'événement exceptionnel de la Crise d'érosion et de salinité messinienne.

Bache et al., 2009. *EPSL*. 286, 139-157.

Maillard et al., 2020. *Mar. Pet. Geol.*

119. Pellen et al., 2016. *Terra Nova* 28

(4), 245-256.

Pellen et al., 2019. *GPC* 181, doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.102988



Mots-clés : Mer Méditerranée, Segmentation, Crise de salinité messinienne, Vallées incisées, *knickpoints*.



Mise en place et évolution du système fluvial de l'Ebre au regard de l'évolution des budgets sédimentaires néogènes des bassins de Valence et Minorque

Romain Pellen¹, Estelle Leroux¹, Marina Rabineau², Daniel Aslanian¹, Jean-Pierre Suc³, Christian Gorini³, Carmine Silenziario⁴, Speranta-Maria Popescu⁵, Jean-Loup Rubino⁶

1, Laboratoire Géodynamique et enregistrement Sédimentaire, IFREMER, Plouzané, France. 2, Laboratoire Géoscience Océan, Université de Bretagne occidentale, Plouzané, France
3, Institut des Sciences de la Terre de Paris, Sorbonne Université, France. 4, Schlumberger Italiana SPA, Italy.
5, Geobiostratdata.consulting, Rillieux la Pape, France. 6, TOTAL, Pau, France.

Les bassins de Valence et Minorque sont l'objet de recherche intensive à différentes résolution/échelles temporelles d'étude. Si l'ouverture du bassin de l'Ebre à la Méditerranée est datée du Tortonien (Urgeles et al., 2011 ; Cameselle et al., 2013), sa dynamique d'ouverture ainsi que la mise en place du fleuve moderne de l'Ebre restent cependant toujours mal contraintes. Cette étude s'est consacrée à la corrélation à l'échelle des bassins de Valence et Minorque des marqueurs chrono- stratigraphiques identifiés au sein du Miocène, du Pliocène et du Quaternaire, respectivement à 23 Ma, 16 Ma, (14 Ma et 11 Ma pour le bassin de Valence), 5,97 Ma, 5,33 Ma, 2,6 Ma, 1,8 Ma, 0,9 Ma, 0,45 Ma), à la cartographie des dépôt-centres sédimentaires, ainsi qu'à la détermination des volumes sédimentaires associés. L'histoire qualitative et quantitative des volumes sédimentaires néogènes au sein des bassins de Valence et Minorque a ainsi pu être reconstruite. Ces résultats témoignent :

- (i) d'un doublement des flux sédimentaires à la transition Serravallien-Tortonien au sein du bassin de Valence, possiblement lié à l'arrêt de la structuration des chaînes Baléares au sein du bassin de Valence (Pellen et al., 2016), ainsi qu'à l'initiation d'un possible drainage du bassin de l'Ebre via différents systèmes fluviaux intra-montagneux (Urgeles et al., 2011) ;
- (ii) d'une augmentation drastique des apports sédimentaires terrigènes au cours de la Crise messinienne, postérieurement à la chute hors normes du niveau marin méditerranéen ; celle-ci pourrait témoigner d'une mise en place du système fluvial moderne de l'Ebre (Pellen et al., 2019) ;
- (iii) d'un doublement des flux sédimentaires entre le Miocène et le Pliocène, en accord avec les observations faites dans le bassin liguro-provençal (Leroux et al., 2017), mais aussi avec celles mondialement observées dans les océans (e.g. Hay et al., 1988) ; cet accroissement est probablement lié à l'érosion intense du bassin de l'Ebre ainsi qu'à la mise en place d'un climat plus humide. Il s'accompagne d'une mise en place des courants de contour au sein du bassin de Minorque, effectifs au moins dès 2,6 Ma (Miramontes et al., 2018) ;
- (iv) d'une augmentation des flux sédimentaires autour de 0,9 Ma lors de la révolution du Pléistocène moyen au sein des deux bassins de Minorque et Valence, concomitant à une augmentation des transferts sédimentaires depuis le système fluvial de l'Ebre vers le domaine profond liguro- provençal, via le chenal profond de Valence.

Cameselle et al., 2013. *Int. J. Earth Sci.*, 103, p.423-440. Hay et al., 1988. *JGR*, 93, p.14933-14940.
Leroux et al., 2017. *Basin Research*, 29, p.305-339. Miramontes et al., 2018. *Geomorphology* 333, p.43-60. Pellen et al., 2016. *Terra Nova* 28 (4), 245-256.
Pellen et al., 2019. *GPC*, 181.
Urgeles et al., 2011. *Basin Research*, 23, p.123-145.

Mots-clés : Mer Méditerranée, Budget sédimentaire, Néogène, Crise de salinité messinienne, Ebre, révolution Plio-Pleistocène.



Implication des reconstructions palinspatiques dans l'évolution des seuils centraux méditerranéens durant la crise de Salinité Messinienne.

Romain Pellen^{1, 2}, Christian Gorini³, Daniel Aslanian¹, Jean-Pierre Suc³,
Speranta-Maria Popescu⁴, Laurent Jolivet³, Marina Rabineau², Jean-Loup
Rubino⁵, Attilio Sulli⁶

1, Laboratoire Géodynamique et enregistrement Sédimentaire, IFREMER, Plouzané, France. 2, Laboratoire Géoscience Océan, Université de Bretagne occidentale, Plouzané, France

3, Institut des Sciences de la Terre de Paris, Sorbonne Université, France. 4, Geobiostratdata consulting, Rillieux la Pape, France.

5, TOTAL, Pau, France.

6, Department of Earth and Marine Sciences, University of Palermo, Italy

Les corridors marins représentent des frontières importantes quant aux déplacements des masses d'eau, biotopes et sédiments au cours du temps. D'origine sédimentaire ou géodynamique, les seuils, mis en évidence soit par les mouvements verticaux, soit par les variations du niveau marin, ont constamment imprimé leur influence dans la répartition des environnements sédimentaires et environnementaux. La crise Messinienne forme un jalon unique dans l'étude des seuils Méditerranéens et Paratéthysiens. Cependant les tentatives passées de reconstructions paléogéographiques et cinématiques au Messinien ont conduit à des modèles variés, souvent basés sur la physiographie actuelle de l'espace Méditerranéen. Ainsi, la transition entre bassins occidentaux et orientaux est souvent située au niveau du seuil peu profond Tunisois-Sicilien, le long de la plateforme Mésozoïque Pélagienne. La validité et les hypothèses sous-jacentes nécessitent alors des tests cinématiques à la lumière des données géologiques et géophysiques actuelles.

À travers la compilation des informations publiées portant sur la segmentation, la composition géochronologique des domaines crustaux et l'évolution environnementale des différents domaines, nous présentons une évolution palinspatique et paléogéographique du domaine central Méditerranéen au Messinien. Ce modèle, cohérent avec les interprétations actuelles des données dans l'espace Méditerranéen, illustre l'importance des reconstitutions cinématiques dans l'histoire des paysages passés et des passages maritimes. En reconstituant l'espace profond Ionien bien plus à l'Ouest, cet essai souhaite interroger le rôle du seuil Siculo-Calabrais dans l'évolution respective des environnements sédimentaires entre les domaines occidentaux et orientaux en Méditerranée durant les différentes étapes de la crise Messinienne.

Mots-clés : Mer Méditerranée, Crise de salinité messinienne, seuil, segmentation, Corridor Siculo-Calabrais



Les épisodes *Lago Mare* associés à la Crise messinienne

Speranta-Maria Popescu^{1*}, Jean-Pierre Suc², Mihaela Carmen Melinte-Dobrinescu³, Nadia Barhoun⁴, Damien Do Couto², Romain Pellen⁵, Marina Rabineau⁵, Christian Gorini²

- 1, Geobiostratdata.consulting, Rillieux la Pape, France.
- 2, Institut des Sciences de la Terre de Paris, Sorbonne Université, France.
- 3, National Institute of Marine Geology and Geoecology, Bucharest, Roumanie.
- 4, Faculté des Sciences ben M'Sik, Casablanca, Maroc.
- 5, Laboratoire Géoscience Océan, Université de Bretagne Occidentale, Plouzané, France.

Les biofaciès *Lago Mare* (LM) correspondent à des incursions épisodiques en Méditerranée d'organismes paratéthysiens (mollusques, ostracodes, dinoflagellés). Les kystes de dinoflagellés en sont les meilleurs marqueurs car ils signent les invasions d'eaux de surface (Popescu *et al.*, 2009, 2015). Les études sur les coupes à terre montrent que le premier et le dernier de ces épisodes (LM1 et LM3) encadrent le paroxysme de la Crise messinienne. Séparés par la Surface d'érosion messinienne -ou Discontinuité messinienne en Sicile (Popescu *et al.*, 2009, 2015 ; Bache *et al.*, 2012 ; Do Couto *et al.*, 2014), ils marquent respectivement la fin du premier temps de la crise dans les bassins périphériques et le brutal ré-ennoïement marin qui clôture son second temps paroxysmal (Clauzon *et al.*, 1996 ; Popescu *et al.*, 2015). Tous deux résultent d'échanges à haut niveau marin entre la Méditerranée et la Paratéthys (Clauzon *et al.*, 2005 ; Suc *et al.*, 2015). Intermédiaire, le LM2 intervient dans la partie ultime de la phase évaporitique des bassins centraux ; il ne peut donc être étudié que dans les forages profonds. L'analyse à haute résolution des foraminifères planctoniques, du nannoplancton calcaire et des kystes de dinoflagellés de sept sites DSDP/ODP (976, 978, 372, 124, 134, 654, 653) a non seulement permis de caractériser le LM2 mais aussi d'enregistrer les LM1 et LM3 dans les bassins centraux. Le LM2 apparaît résulter d'un déversement brutal des eaux égéennes isolées par le seuil de l'arc hellénique après rupture de celui-ci vers la fin du paroxysme. Dans l'avant-fosse apenninique, plusieurs incursions marines ont, après la remise en eau du bassin méditerranéen, franchi le seuil de Pelagosa en apportant les organismes paratéthysiens, c'est le LM3 (Pellen *et al.*, 2017). Dans les coupes à terre, les trois types d'organismes paratéthysiens marqueurs du *Lago Mare* peuvent se trouver associés. Il peut arriver aussi que seuls les mollusques et/ou les ostracodes soient présents : cela indique leur maintien dans des environnements lagunaires.

- Bache *et al.*, 2012. *Bas. Res.* 24, 125-153.
 Clauzon *et al.*, 1996. *Geology* 24, 363-366.
 Clauzon *et al.*, 2005. *Bas. Res.* 17, 437-462.
 Do Couto *et al.*, 2014. *Mar. Pet. Geol.* 52, 57-76.
 Pellen R. *et al.*, 2017. *Geobios* 50, 237-257.
 Popescu *et al.*, 2009. *Palynology* 33, 105-134.
 Popescu S.-M. *et al.*, 2015. *Mar. Pet. Geol.* 66, 55-70.
 Suc *et al.*, 2015. *Mar. Pet. Geol.* 66, 231-245.

Mots-clés : Kystes de dinoflagellés, Surface d'érosion (Discontinuité) messinienne, eaux de surface paratéthysiennes.



Evidences of pre-Zanclean marine reflooding of the Mediterranean Basin

Speranta-Maria Popescu¹, Jean-Pierre Suc^{2*}, William Cavazza³, Mihaela Carmen Melinte-Dobrinescu⁴, Nadia Barhoun⁵, Christian Gorini²

- 1, GeoBioStratData.Consulting, Rillieux la Pape, France.
- 2, Institut des Sciences de la Terre, Sorbonne Université, Paris, France.
- 3, Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-ambientali, Università di Bologna, Bologna, Italie.
- 4, National Institute of Marine Geology and Geoecology, Bucharest, Romania.
- 5, Faculté des Sciences ben M'Sik, Casablanca, Morocco.

The base of the Trubi Formation in southern Italy -formally defined as the Zanclean Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) at 5.33 Ma- has been traditionally considered as marking the re-establishment of normal marine conditions in the Mediterranean basin after the Messinity Salinity Crisis (Hilgen & Langereis, 1993). A coastal sedimentary prism consistently underlying the Trubi Formation along the southeastern coast of Calabria is composed of one to three progradational parasequences including nearshore, beach, and fluvial sedimentary facies, thus indicating that a relatively high baselevel existed before deposition of the Trubi Formation (Cavazza & DeCelles, 1998). Integration of calcareous nannoplankton and foraminifera, dinoflagellate cysts, and pollen grains analyses shows that such a sedimentary prism is full marine and has a latest Messinian age (Popescu *et al.*, 2021). This points to a marine reflooding of the Mediterranean basin before the beginning of the Zanclean as supported in many places around the Mediterranean Basin (Morocco, Alboran Sea, Southeastern Spain, Apennine foredeep, Dardanelles Strait, etc.: Cornée *et al.*, 2006 ; Bache *et al.*, 2012 ; Lancis *et al.*, 2015 ; Karakitsios *et al.*, 2017). The age of the reflooding has been proposed at 5.46 Ma by Bache *et al.* (2012). The coastal sedimentary prism evidenced in Calabria is thus correlated with the Arenazzolo Formation in Sicily (Popescu *et al.*, 2021). These data contribute to specify the status of the Sicilian Caltanissetta Basin as a peripheral basin, probably somewhat deeper than the other peripheral basins, where evaporites (including the halite and K-Mg salts) belong to the 1st step (marginal) of the crisis (5.97-5.60 Ma), as also supported by several data in the region (Bertini *et al.*, 1998; El Euch-El Koundiet *al.*, 2009).

- Bache, F., Popescu, S.-M. *et al.*, 2012. *Bas. Res.*, 24, 125–153.
 Bertini, A., Londeix, L. *et al.*, 1998. *Micropaleontology*, 44, 413-433.
 Cavazza, W., DeCelles, P.G., 1998. *Tectonophysics*, 298, 223–241.
 Cornée, J.-J., Ferrandini, M. *et al.*, 2006. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 230, 129-154.
 El Euch-El Koundi, N., Ferry, S. *et al.*, 2009. *Terra Nova*, 21, 41-48.
 Hilgen, F.J., Langereis, C.G., 1993. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 118, 167–179.
 Karakitsios, V., Roveri, M. *et al.*, 2017. *Bas. Res.*, 29, 203-233.
 Lancis, C., Tent-Manclús, J.E. *et al.*, 2015. *Geol. Acta*, 13, 211–228.
 Popescu, S.-M., Cavazza, W. *et al.*, 2021. *Journ. Geol. Soc.*, 178,3, jgs2020-183.



Key-words: Post-crisis marine reflooding, Calabria, Sicily.

Upstream prolongation of Messinian canyon in the Rhone system and its tributaries

Jean-Loup Rubino^{1*}, Jean-Pierre Suc², Gilles Dromart³, Bastien Huet², Marina Rabineau⁴, Frédéric Ricciardi¹, Estelle Leroux⁵, Speranta-Maria Popescu⁶, Nicolas Loget², Jean-Claude Hippolyte⁷, Olivier Bellier⁷, Paul Le Strat⁸, Stéphane Molliex⁴, Cédric Duvail⁹, Deborah Sicilia¹⁰, Mihaela Carmen Melinte-Dobrinescu¹¹, Philippe Sorrel¹², Cyril Schamper¹³, Christian Camerlynck¹³, Ludovic Bodet¹³, Christian Kaczorowski¹³, Bernard Chirol¹⁴

¹ Total CSTJF, Pau, France

² Institut des Sciences de la Terre, Sorbonne Université, Paris, France ³ Tharsis Energy SA, Sainte-Foy-Lès-Lyon - France

⁴ Laboratoire Géoscience Océan, Université de Bretagne occidentale, Plouzané, France

⁵ Laboratoire Géodynamique et Enregistrement sédimentaire, Ifremer, Plouzané, France ⁶

GeoBioStratData.Consulting, Rillieux la Pape, France

⁷ CEREGE, Université d'Aix-Marseille, Aix en Provence, France ⁸ Castelnau le Lez, France

⁹ GEOTER SAS, FUGRO Group, Clapiers, France

¹⁰ EDF – DIPNN – CEIDRE, TEGG/Service Géologique Géotechnique, Aix en Provence, France ¹¹ National Institute of Marine Geology and Geoecology, Bucarest, Roumanie

¹² Laboratoire de Géologie de Lyon, Université de Lyon, Villeurbanne, France

¹³ Milieux env., transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols, Sorbonne Université, Paris, France ¹⁴ Saint-Bernard, France.

The first 3D map of the Messinian Rhone River did not go upstream of Valence city because of data consistency. By reevaluating all available data, we can now propagate the Messinian incision 150 km northward up to the Jura and Chartreuse ranges. As in the South, present-day river network is superimposed on the incision, except in places where rivers realized epigenesis during the Late Pliocene. This is evidenced in the Saint-Désirat meander as well as near Vienne where in both places Pliocene marine sediments rest over the basement. Further North as shown by Mandier and Ballesio the Rhone valley runs into the Garon River. Northward, in Lyon, recent works confirm the Russo's views and a major incision into the basement up to 0 m of elevation is proved, 250/320 m beneath the pre-Messinian interfluvies. Upstream of Lyon, seismic and electric profiles, and spot outcrops where marine Pliocene occurs tend to show that the valley partly occupied the trace of the Ain River. The valley reached Ambérieu, where boreholes provide marine microfossils just in front of the "Cluse des Hôpitaux", a major valley cut through the Jura Ranges. Therefore, it is tempting to consider this major valley, which is out of scale from the present-day Albarine Stream, as the result of the Messinian incision of the Rhone River as suggested by Clauzon a long time ago. Ultimately BRGM maps suggest an incision down to the Génissiat Dam. Regarding the eastern tributaries flowing from the Alps, incision seems to run 50 km landward such as the Bievre and its tributaries that go up to the Chartreuse Front where marine Pliocene has been reported in two wells, Paladru and Saint-Ondras. In this respect, we assume that the Cluse de l'Isère is not only the product of a glacial incision but was predated by a Messinian one, as revealed by two seismic profiles, one close to Grenoble where a double erosion is imaged and another one downstream near Romans where an incision 400m deep can be easily propagated 50 km upstream. The Northward extension of the Saone and Rhine Messinian rivers is not yet solved because of a lack of good data and a consistent age model, however preliminary boreholes analysis seems to show that Pliocene is encased within Miocene. Meanwhile we significantly update the initial mapping in the northern part of the Rhone system and the regressive erosion unsurprisingly propagates far landward in agreement with the huge Messinian sea-level fall like for the others large peri-Mediterranean rivers such as the Nile and the Shabi system.





A modeling approach on Evaporites volume and water budget calculation during the Messinian Salinity Crisis: Case study of the Central Mallorca Depression

Fadl Raad ^{*1}, Ronja Ebner ², Paul Meijer ², Johanna Lofi ¹, Agnès Maillard ³, Hanneke Heida⁴, Daniel Garcia-Castellanos ⁴

¹ Géosciences Montpellier, CNRS, Université de Montpellier, Université des Antilles - Université de Montpellier 2 – France

² Department of Earth Sciences, Utrecht University, Princetonlaan 8A 3584 CB Utrecht, The Netherlands

³ Géosciences Environnement Toulouse (GET), Observatoire Midi Pyrénées, Université de Toulouse - France

⁴ Geosciences Barcelona (GEO3BCN-CSIC), Barcelona, Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona, Spain.

The upperMiocene's Messinian Salinity Crisis (MSC) lead to the reduction of water exchange between the Atlantic and Mediterranean and consequently the deposition of an immense evaporitic body, also known as the Mediterranean Salt Giant (MSG), in a relatively short time interval of ~640kyrs. Today, the evaporites belonging to the Salt Giant are mostly conserved offshore (>90%) below a thick sedimentary unit which is Pliocene to Quaternary in age, and distributed in several basins lying at different water depths.

The Central Mallorca Depression (CMD) contains a very well preserved evaporitic sequence, including halite that has been studied and mapped recently by several authors. Most recently, Raad et al. (2021) showed that the MSC evaporitic sequence in the CMD could be a non-deformed analogue of the key MSC area represented by the Caltanissetta Basin in Sicily. This assumed congruity makes the CMD an interesting system to study, which could lead to new insight into MSC events.

Physics based box models, as simplified as they might look, help in examining some factors and observations related to the MSC. Those models have been widely used in the literature of the MSG in the past two decades. Those models so far have been either applied to the Mediterranean Sea as a whole focusing on the strait of Gibraltar, or focused on the influence of the strait of Sicily between the Western and Eastern Mediterranean Sea. In this study, for the first time we use scaled down versions as we apply box models only on a single sub-basin, the CMD, where a good, high- and low-resolution seismic reflection data coverage is available.

As a first step, we quantify the volumes of the present-day MSC units. We then use the reconstructed pre-MSC paleo-bathymetry to apply different box models approaches by changing the connection between the CMD and the rest of the Mediterranean. We show that a persistent connection between the CMD and the Mediterranean is needed during the Primary Lower Gypsum (PLG) stage in order to supply the basin with the needed ions to form the observed gypsum. For the halite, on the contrary, we show that the observed halite volume can be deposited from an 850m thick brine column at halite saturation. We conclude from our results that a drawdown of at least 850m (sill depth) is necessary, since all other tested scenarios would lead to an excess of deposited halite.

Mots-Clés : Messinian Salinity Crisis, Central Mallorca Depression, Box modeling, Evaporites.

This research is carried out under the SALTGIANT ETN, a European project funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement number 765256.



Evolution and control of the Late Messinian Nahr Menashe fluvial system, Northern Levant basin, Offshore Lebanon

Marwa Shmeis^{1*}, Benoît Didier ², Jean-Loup Rubino³, Christian Gorini⁴, Alexis Capron² et Carlo Cazzola ²

¹ ENSG – Nancy, France

² TOTAL SA, Division Exploration, Zone MENA, Paris la Défense, France

³ TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – France

⁴ Institut des Sciences de la Terre de Paris, Sorbonne Université, France

The presence of fluvial deposits at the top of the Messinian salt in the Levant basin was mentioned by several authors, e.g. Bertoni and Cartwright, 2007 and, above all, Madof et al. (2019), who described the geometry of a large fluvial system, called Nahr Menashe, from 3D seismic data.

In the Levant basin, the evaporite sequence is truncated by a major erosional surface (M horizon, IMTS or IES depending on the authors) extending into the deep Levant basin. On top of it (i.e. on top of Messinina salt), several fluvial systems were identified from 3D seismic data (Isopach, coherency and spectral decomposition maps): 1) Meandering channels, incising into the salt; salt dissolution features (sinkhole-like), synchronous from these channels, were identified in the north-western part of the study area. They indicate the occurrence of a phase of emersion that exposed the top of evaporite sequence. 2) Meandering constructive channel belts and coeval 200m-thick aggrading flood plain. The locations of these meander belts were likely controlled by folds crest formed in the salt during the Messinian gravity deformation phase. 3) Deep fluvial incisions, which cut through the previously deposited fluvial deposits. Within these incised valleys, braided stream systems can be identified. This incision is related to a final base-level drop prior the following Pliocene transgression. 4) The resulting canyons were later filled during the Pliocene transgression by marine sediments drapping the remnant morphologies.

This fluvial system came from the North (Syria and Turkey). It was likely connected to Messinian canyons, mapped onshore, which collected several drainage systems like the paleo-Oronte river. Its outlet was located South of Eratosthenes sea mound where low stand deltas, prograding in a restricted basin and truncated by a sharp erosional surface interpreted as a wave cut, were evidenced.

These observations prove a subaerial origin of the truncation surface with evidences of dissolution features on top salt. Several stages of incisions that affected the top salt, the intra-Nahr Menashe unit and the top of Nahr Menashe deposits were also identified.

These observations definitively rule out the salt deposition in a “deep” brine at least at the end of the crisis.

Key words: Eastern Mediterranean Sea, Levant basin, Messinian Salinity Crisis, IMTS, Nahr Menashe deposits, Dissolution features, Sinkholes, Fluvial canyons, Meandering channels, Meander belts, Subaerial erosion, Emersion



Climat et niveau océanique en façade atlantique sud-ouest européenne lors de la Crise messinienne

Jean-Pierre Suc^{1*}, Séverine Fauquette², Sophie Warny³, Gonzalo Jiménez-Moreno⁴

1, Institut des Sciences de la Terre de Paris, Sorbonne Université, France.

2, Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier, Université de Montpellier,

France. 3, Department of Geology and Geophysics, Louisiana State University,

Baton Rouge, USA. 4, Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Universidad de Granada, Espagne.

La succession mio-pliocène d'Andalousie atlantique (bassin du Guadalquivir) est connue comme ancienne candidate pour le stratotype et la dénomination du dernier étage du Miocène (Andalousien : Perconig, 1974). Sa coupe-type, située à Carmona (32 km à l'est de Séville), a fait l'objet de plusieurs études stratigraphiques et micropaléontologiques (Perconig, 1974; Berggren & Haq, 1976; Sierro *et al.*, 1993, 1996). Nous y avons réalisé plusieurs campagnes de terrain de 1987 à 1999, comprenant notamment la réalisation de trois forages carottés, qui ont permis l'acquisition de compléments bio- et magnétostratigraphiques et, surtout, une analyse palynologique (grains de pollen et kystes de dinoflagellés) à haute résolution. La flore pollinique et la quantification climatique autorisent des corrélations climatostratigraphiques avec la courbe $\delta^{18}\text{O}$ du Site ODP 982 (Atlantique Nord : Hodell *et al.*, 2001). Les variations du rapport entre kystes de dinoflagellés et grains de pollen (Warny, 1999) permettent d'identifier les hauts et bas niveaux océaniques, les deux plus bas niveaux étant successivement marqués par le dépôt d'une calcarénite littorale (Formation de la Calizza Tosca sur laquelle est bâtie la ville de Carmona) et par un épisode érosif subaérien. Après corrélation avec le forage régional Montemayor 1 proche de Huelva (Pérez-Asensio *et al.*, 2012 ; Jiménez-Moreno *et al.*, 2013), ces deux baisses du niveau océanique sont respectivement mises en correspondance avec les deux temps de la Crise messinienne (Clauzon *et al.*, 1996). L'emboîtement des dépôts inscrits dans la vallée messinienne conduit à évaluer une chute du niveau océanique global de l'ordre de 130 m lors du paroxysme de la Crise messinienne.

Berggren W.A., Haq B.U., 1976. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 20, 67-129. Clauzon G. *et al.*, 1996. *Geology*, 24, 363-366.

Hodell D.A. *et al.*, 2001. *Paleoceanography*, 16, 2, 164-178.

Jiménez-Moreno G. *et al.*, 2013. *GSA Bull.*, 125, 432-444.

Perconig E., 1974. *Mém. B.R.G.M.*, 78, 2, 663-673.

Pérez-Asensio J.N. *et al.*, 2012, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 326-328, 135-151. Sierro F.J. *et al.*, 1993. *Mar. Micropaleontol.*, 21, 143-168.

Sierro F.J. *et al.*, 1996. In "Tertiary Basins of Spain", Cambridge Univ. Press, 339-345. Warny S., 1999. Thèse Univ. Cath. Louvain.

Mots-clés : Palynologie, climatostratigraphie, haut - bas niveaux océaniques, deux temps Crise messinienne.



**T11.11 Cartographier les couplages entre
la déformation de la lithosphère et les
processus de surfaces : intégrer le
contexte géodynamique à la paléo-
géographie**



Cartes paleo-géologiques S2S de l'Europe de l'ouest à l'Yprésien (52 Ma) et au Bartonien (40 Ma)

Justine Briais ^{*1}, Cécile Allanic ¹, Julien Baptiste¹, Paul Bessin², François Guillocheau³, Eric Lasseur¹ Alexandre Ortiz ^{4&6}, Guillaume Baby⁵, Charlotte Fillon⁶ Johan Yans ⁷, Augustin Dekoninck⁷ et S2S project Team

¹ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

² LPG – Laboratoire de Planétologie et Géodynamique – UMR 6112, Le Mans Université France

³ Université de Rennes – CNRS, Géosciences-Rennes, UMR 6118, 35000 Rennes, France

⁴ Université de Pau et des Pays de l'Adour – France

⁵ IPGP –

⁶ TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Fégér (CSTJF) – TOTAL – France

⁷ Université de Namur - Belgique

La période du Paléogène correspond à une période de déformations importantes de la plaque Ouest-Europe liées à la dynamique mantellique de l'Atlantique-Nord et aux orogènes pyrénéen et alpin. Les déformations impliquent l'émersion et l'érosion du domaine intracratonique, occasionnant une réorganisation du système *source-to-sink* (S2S).

Afin de caractériser les déformations intraplaques (*far field*) à l'échelle ouest-européenne, et leur impact sur les systèmes *source to sink*, des cartes paléo-géologiques ont été construites à deux périodes clefs de l'évolution de l'orogénèse pyrénéenne. Elles présentent l'originalité de coupler des données structurales, géomorphologiques, thermochronologiques et paléogéographiques.

Les deux périodes clefs considérées sont : l'Yprésien (52Ma) correspondant, dans le domaine pyrénéen à la phase majeure d'inversion des structures extensives héritées ; et le Bartonien (40 Ma) marquant le paroxysme de la collision continentale :

La carte de l'Yprésien (52 Ma) montre : dans le domaine orogénique, l'inversion du rift et la création des premiers reliefs, ainsi que la mise en place du bassin flexural (retroforeland). Ce dernier est alimenté par le domaine orogénique et par le Massif Central, et constitue la zone de sink principal. Dans le domaine intracratonique, la déformation associée à l'orogénèse reste mineure. La configuration héritée de la phase de déformation sélandienne, est constituée de reliefs tels que ceux du Massif Central, du Massif armoricain et des Ardennes, marqués par des surfaces d'aplanissement. Ces domaines en érosions entourent et alimentent le bassin de Paris, ouvert sur la mer du Nord correspondant au *sink* final.

La carte du Bartonien (40 Ma), est marquée par des évidences de la collision continentale enregistrée dans tout le domaine intracratonique par la réactivation de failles crustales héritées. Ces déformations impliquent une segmentation de certains domaines paléogéographiques qui a un impact direct sur le système *source to sink* en limitant et réduisant les exports. Parmi ces exemples, citons la mise en place des bassins transtensifs du Massif Central ou encore la mise en place du domaine de l'Artois séparant le bassin anglo- parisien de la Mer du Nord ; le *sink* final de la zone devient alors les Approches de l'Ouest.

Ce travail a été financé par le projet Source-to-Sink (BRGM-TOTAL).

Mots-Clés : Source to Sink, Pyrénées, déformation intraplaque, Europe de l'ouest



Diagramme de Wheeler *Source to Sink* appliqué à l'orogénèse pyrénéenne

Justine Briais^{*1}, Charlotte Fillon², Eric Lasseur², Alexandre Ortiz^{2&3}, Sylvain Calassou², Paul Bessin⁴, Julien Baptiste¹, Sébastien Castelltort⁵, François Guillocheau⁶, Guillaume Baby⁷

¹ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

² TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Férat (CSTJF) – TOTAL - France

³ Université de Pau et des Pays de l'Adour – France

⁴ LPG – Laboratoire de Planétologie et Géodynamique – UMR 6112, Le Mans Université France

⁵ Université de Genève - Suisse

⁶ Université de Rennes – CNRS, Géosciences-Rennes, UMR 6118, 35000 Rennes, France

⁷ IGP – 1 rue Jussieu, 75238 Paris

L'approche *Source to Sink* (S2S) vise à mettre en cohérence la dynamique des zones source, de transfert et de sédimentation dans le temps et dans l'espace. L'approche temporelle de la sédimentation est depuis longtemps résumée sous forme de diagramme de Wheeler permettant de mettre en évidence les périodes de dépôts et de hiatus, ainsi que les passages latéraux et l'extension du bassin.

Dans une approche *Source to Sink*, appliquée au domaine orogénique, nous proposons d'intégrer la dynamique de la zone source dans les diagrammes de Wheeler. Ceci est appliqué au domaine pyrénéen et à ses deux avant-pays.

Le long de coupes Nord-Sud, outre les diagrammes de Wheeler classiques, sont intégrés les déplacements verticaux, la taille de la chaîne au cours du temps en se basant sur les données thermochronologiques et structurales.

La dynamique de transport est également reportée sur ces diagrammes en intégrant les données de traçage de source et les directions de transport.

La construction de ces diagrammes permet de mettre en regard les différentes étapes de la croissance du prisme orogénique avec :

- 1) les différents stades de remplissage des bassins adjacents (*foreland* et *retroforeland*), notamment, les changements de direction de drainage ou encore le passage *underfilled* à *overfilled*.
- 2) les déformations *far field* (Massif Central et Bassin de Paris) enregistrées par les périodes d'érosion et de hiatus.

Ce travail a été financé par le projet Source-to-Sink (BRGM-TOTAL).

Mots-Clés : Source to Sink, exhumation, Pyrénées, Wheeler, déformation far field.



Cartographie du système « Source-to-sink » péri-Pyrénéen durant le début de l'orogénèse.

Eric Lasseur ¹, Charlotte Fillon ², Justine Briaïs ¹, Alexandre Ortiz ^{*2,3}, François Guillocheau ⁴, Paul Bessin ⁵, Guillaume Baby ⁷, Julien Baptiste ¹, Jessica Uzel ⁴, Cécile Robin ⁴, Sylvain Calassou ², Gianluca Frasca ⁶, Sebastien Castelltort ⁸, S2S Project Team

¹ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

² TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Fégér (CSTJF) – TOTAL – France

³ Université de Pau et des Pays de l'Adour – France

⁴ Univ. Rennes – France

⁵ Université du Maine - France

⁶ Institute of geosciences and earth resources IGG – Italy

⁷ Institut de Physique du Globe – Paris - France

⁸ Université de Genève - Suisse

Les connaissances acquises sur l'exhumation de la chaîne Pyrénéenne et l'évolution des bassins d'avant-pays adjacents permettent à présent d'appréhender ce système orogénique complexe dans une démarche intégrative dans l'espace et le temps.

Cette approche, dite « source-to-sink » s'attache à comprendre l'évolution du routage sédimentaire depuis la Source (relief orogénique, craton, recyclage de bassin) en passant par la zone de transfert (périphériques ou internes au bassin) jusqu'au réservoir final (bassin flexural, bassin turbiditique profond). Nous proposons, dans le cadre de cette nouvelle cartographie, de compiler les données disponibles et nouvellement acquises dans le projet, sur l'ensemble du domaine péri-pyrénéen du Golfe du Lion à l'Est jusqu'au Golfe de Gascogne à l'Ouest en incluant le Massif Armoricaïn au Nord jusqu'au bassin de Madrid au Sud.

La réalisation de ces cartes s'appuie sur l'utilisation de nombreuses méthodes et outils, tels que les reconstructions cinématiques du système Ibérie-Europe-Méditerranée, les coupes restaurées, l'histoire d'exhumation par thermochronologie, le traçage des sources, la caractérisation des surfaces d'altération et d'érosion, la synthèse de l'activité des accidents structuraux majeurs, les reconstructions paléogéographiques, l'analyse des géométries sédimentaires et des directions de transport ainsi que la quantification des volumes préservés dans les bassins.

Les pas de temps choisis pour ces cartes permettent de rendre compte de différents stades d'évolution tectono-sédimentaire du système péri-pyrénéen au stade de quiescence de l'orogénèse (1) à 65 Ma, Danien, et aux stades précoces de l'orogénèse (2) Thanétien terminal (56 Ma) et (3) Yprésien (52 Ma). Les compilations effectuées mettent en regard domaines exhumés et zone de sédimentation en termes de flux et de volumes, et permettent de cartographier les systèmes de routage et leur évolution au cours d'un cycle de construction d'un orogène.

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

Mots-Clés : Source to Sink, Pyrénées, Aquitaine, Ebre, Thermochronologie, paléogéographie,



bassin detransfert.



Évolution du mont sous-marin des Glorieuses (SO Océan Indien) et du bassin profond Somali depuis le Crétacé

E. Leroux^{a,*}, J.W. Counts^b, S.J. Jorry^a, G. Jouet^a, S. Revillon^c, M.K. BouDagher-Fadel^d, S. Courgeon^{a,e}, C. Berthod^f, G. Ruffet^g, P. Bachèlery^f, E. Grenard-Grand^{a,h}

^a IFREMER, Laboratoire Géodynamique et enregistrements Sédimentaires, Plouzané, France

^b USGS, Washington, USA

^c SEDISOR, Place Nicolas Copernic, Plouzané, France

^d University College London, Department of Earth Science, United Kingdom

^e Geneva Petroleum Consultants International, Geneva, Switzerland

^f Université Clermont-Auvergne, OPGC, Laboratoire Magma et Volcans, France

^g CNRS (CNRS/INSU) et Université de Rennes 1, Géosciences(UMR 6118), France

^h Université de Caen-Normandie, UMR 6143 M2C morphodynamique continentale et côtière, France

L'âge d'édification, l'origine et l'évolution géologique de l'archipel des Glorieuses (sud-ouest de l'océan Indien) sont encore méconnus. La reconstruction stratigraphique long-terme de ce mont sous-marin et du bassin océanique adjacent permet d'identifier les mécanismes qui se sont produits au fil du temps, pour finalement façonner les îles modernes et les plates-formes récifales qui émergent aujourd'hui. Différentes terrasses, actuellement submergées le long des flancs des Glorieuses, ont été interprétées comme résultant d'épisodes successifs d'édification et d'enneigement des carbonates au cours des derniers 62 Ma. De nouvelles datations isotopiques et biostratigraphiques, couplées à une étude de stratigraphie sismique, permettent de réévaluer l'évolution verticale de l'archipel au cours du Cénozoïque.

Même si les pentes sont maigres et abruptes, empêchant toute continuité stratigraphique depuis le domaine de plate-forme jusque dans le bassin, notre travail propose un cadre chronostratigraphique cohérent pour les marqueurs et les séquences sismiques identifiés dans le bassin profond. Il discute également d'un modèle géologique long-terme incluant les principaux processus contrôlant l'origine des dépôts (événements volcaniques, phases de subsidence et de soulèvement, climat et hydrodynamisme) et leur impact quantitatif sur l'évolution du système. Nos résultats démontrent que: (i) le mont sous-marin volcanique des Glorieuses a émergé suite à (au moins) deux pulses magmatiques *fini* Crétacé, Turonien puis Maastrichtien; (ii) au moins deux soulèvements potentiels sont reconnus au cours du Tertiaire (Paléogène et/ou Éocène et Tortonien); (iii) la sédimentation a enregistré un changement brutal à l'Éocène tardif probablement en lien avec des changements océanographiques régionaux majeurs dans l'océan Indien occidental; (iv) l'export sédimentaire de la plate-forme vers le bassin (via les nombreux processus gravitaires) s'est fortement accru après le Miocène moyen, probablement du fait de la mise en place de la mousson asiatique et de l'augmentation des processus d'écoulement gravitaires. Enfin, l'archipel des Glorieuses, bien que situé à proximité des îles Comoriennes, semble avoir une histoire beaucoup plus longue que le magmatisme des Comores, et son évolution semblerait plus proche des volcans sous-marins à l'origine des Seychelles externes.

Mots-clés : mont sous-marin des Glorieuses, Bassin Somali, Stratigraphie sismique, tectonique, mouvements verticaux (subsidence, soulèvement), volcanisme, plate-forme



carbonatée, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$



Quiescence in fore-arc region after volcanism, sedimentation and subduction-related deformation: the case of Antigua, Lesser Antilles.

Leny Montheil^{*1}, Mélody Philippon¹, Philippe Münch¹, Douwe Van Hinsbergen³, Jean-Jacques Cornée¹, Pierre Camps¹.

¹ Géosciences Montpellier, Université de Montpellier, France.

² Department of Earth Sciences, University of Utrecht, Holland.

Antigua is an Oligocene extinct volcanic island that stands in the fore-arc of the curved LesserAntilles subduction zone. Few cartographic, petrological and stratigraphic works were underwent, mainly from the 70's to the 90's, and showed that the island belongs to the ancient Lersser Antilles arc. However, the tectono-stratigraphic evolution of the island is still uncertain and Antigua remains an unknown part of the Lesser Antilles fore-arc.

In this work, we present new Ar-Ar dating of the volcanic part of the island and revised biostratigraphic data from the sedimentary part. We show that Antigua 1/ emerged after an intense period of volcanism between 35 and 29 Ma that was associated with Rupelian continental deposits, 2/ subsided during the Chattian after the cessation of magmatism allowing the development of a Chattian carbonate platform and 3/ finally re-emerged during Miocene. We also performed the first complete mapping of the structures of the island and a kinematic analysis using paleotensors and anisotropy of the magnetic susceptibility analysis. We show that during the Rupelian, a syn-sedimentary and syn-volcanic NE-SW, perpendicular to the trench, extension is accommodated by N150 to N90 trending normal faults. During the Chattian, there is a change in strain orientation from NE-SW to E-W. This change is accommodated by the implementation of N40 trending normal fault and could be associated with a regional switch in deformation style from the opening of Kalinago back-arc basin (Eocene to Late Oligocene) to the V-shape basins development (Late Oligocene to Miocene) probably accommodating the fore-arc curvature. Surprisingly, after the Miocene event, no more tectonic or volcano-sedimentary activity is recorded in Antigua.

This work highlights that even in active fore-arc, such as the northern Lesser Antilles one, there is local areas that do not show any evidence of deformation or sedimentation and this over a long period of time. This raises the question of how we interpret the absence of such evidences in active of formerly active convergent regions.

Mots-clés : Antigua, Forearc evolution, Upper plate strain partitioning, Arc cessation, Subduction dynamics.



Cartographie du système « Source-to-sink » péri-Pyrénéen

Alexandre Ortiz ^{*1,4}, Charlotte Fillon ⁴, Eric Lasseur ³, Justine Briais ³,
 François Guillocheau ², Paul Bessin ⁵, Guillaume Baby ⁷, Julien Baptiste ³,
 Jessica Uzel ², Cécile Robin ², Sylvain Calassou ⁴, Gianluca Frasca ⁶, Sebastien
 Castellort ⁸, S2S Project Team

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour – France

² Univ. Rennes – France

³ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

⁴ TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Fégér (CSTJF) – TOTAL – France

⁵ Université du Maine - France

⁶ Institute of geosciences and earth resources IGG – Italy

⁷ Université de Paris – Institut de Physique du Globe – France

⁸ Université de Genève - Suisse

Les connaissances acquises sur l'exhumation de la chaîne pyrénéenne et l'évolution des bassins d'avant-pays adjacents permettent à présent d'appréhender ce système orogénique complexe dans une démarche intégrative dans l'espace et le temps.

Cette approche, dite « source-to-sink » s'attache à comprendre l'évolution du routage sédimentaire depuis la Source (relief orogénique, craton, recyclage de bassin) en passant par la zone de transfert (périphériques ou internes au bassin) jusqu'au réservoir final (bassin flexural, bassin turbiditique profond). Nous proposons, dans le cadre de cette nouvelle cartographie, de compiler les données disponibles et nouvellement acquises dans le projet S2S, sur l'ensemble du domaine péri-pyrénéen du Golfe du Lion à l'Est jusqu'au Golfe de Gascogne à l'Ouest en incluant le Massif armoricain au Nord jusqu'au bassin de Madrid au Sud.

La réalisation de ces cartes s'appuie sur l'utilisation de nombreuses méthodes et outils, tels que les reconstructions cinématiques du système Ibérie-Europe-Méditerranée, les coupes restaurées, l'histoire d'exhumation par thermochronologie, le traçage des sources, la caractérisation des surfaces d'altération et d'érosion, la synthèse de l'activité des accidents structuraux majeurs, les reconstructions paléogéographiques, l'analyse des géométries sédimentaires et des directions de transport ainsi que la quantification des volumes préservés dans les bassins.

Les pas de temps choisis pour ces cartes permettent de rendre compte de différents stades d'évolution tectono-sédimentaire du système péri-pyrénéen au stade précoce de l'orogénèse - (1) à 52 Ma, Yprésien, aux stades d'orogénèse mature - (2) à 40 Ma, Bartonien et (3) à 34 Ma, Priabonien ainsi qu'aux périodes post-orogénique - (4) à 24 Ma, Chattien et (5) à 11 Ma, Tortonien. Les compilations effectuées mettent en regard domaines exhumés et zone de sédimentation en termes de flux et de volumes, et permettent de cartographier les systèmes de routage et leur évolution au cours d'un cycle de construction/destruction d'un orogène.

Travaux de recherche financés et réalisés dans le cadre du programme BRGM-TOTALSource-to-Sink

Mots-Clés : Source to Sink, Pyrénées, Aquitaine, Ebre, Thermochronologie, paléogéographie, bassin detransfert, recyclage



T13.1 Plate motion and biosphere emotions : the micropaleontological record



Artificial Intelligence and Micropaleontology: a case study from the Eocene genus *Podocyrthis*

Veronica Carlsson ^{*1,2}, Taniel Danelian¹, Pierre Boulet ², Philippe Devienne ²,
Hammouda Elbez ², Aurelien Laforge ^{1,2}

¹ Laboratoire Evolution, Ecologie et Paléontologie (Evo-Eco-Paléo) – CNRS : UMR 8198, Université des Sciences et Technologies de Lille – France

² Laboratoire CRISTAL (Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille) – CNRS : UMR 9189, Université des Sciences et Technologies de Lille – France

The work of a micropaleontologist demands hours of quantitative collection of data and classification that can in many cases be extremely challenging and not many taxonomic experts exist. In order to solve this problem, artificial intelligence is here being used to automatically classify closely related morphological species of *Podocyrthis*, an Eocene genus that has an excellent and widespread record that allows its various species to be used in Middle Eocene biostratigraphy of oceanic sediments. For this work, 1087 images of *Podocyrthis* species divided into 8 classes from the most abundant *Lampterium* and *Podocyrthog* lineages was used. Each image taken on one field of view (FOV) was taken on several focal points and stacked in Helicon Focus 7. Stacked images were then segmented using ImageJ which also transformed the images into 8-bit black and white images with reverse colors, so that the background appeared black and the radiolarians white. The type of neural network being used was deep learning Keras convolutional layers implemented into Nengo, a novel spiking neural network, that closely imitates the biological brain and is highly flexible and extensible. The dataset consisting of the images was divided into a training set consisting of 80% of the images and a validation set with the remaining 20%. Our preliminary results show a classification accuracy of about 75-80 percent, which is promising because it indicates that the neural network works and can read common pattern occurring within and between different classes from the training dataset.

Mots-Clés : Radiolarians, Podocyrthis, Middle Eocene, classification, Artificial Intelligence, Nengo, Spiking neural network



Middle Jurassic to Lower Cretaceous radiolarian ages constrain the geodynamic evolution of the Tethyan oceanic realm preserved in Armenia

Taniel Danelian ^{*1}, Alain Person ², Ghazar Galoyan³, Gayané Asatryan³, Lilit Sahakyan³, Monique Seyler⁴

¹ Univ. Lille, CNRS, UMR 8198 Evolution, Ecologie et Paléontologie (Evo-Eco-Paléo) – Cité Scientifique, Bât. SN5, 59655 Villeneuve d'Ascq – France

² ISTE-P, Sorbonne Université, 4 place Jussieu, Paris, France

³ Institute of Geological Sciences, National Academy of Sciences of Republic of Armenia, M. Baghramian Ave., 24a, 0019, Yerevan, Armenia

⁴ Univ. Lille, CNRS, UMR 8187, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) – Cité Scientifique, Bât. SN5, 59655 Villeneuve d'Ascq – France

The Sevan-Akera ophiolitic zone originated in a Tethyan oceanic realm that was situated between Eurasia and the Gondwana-derived southern Armenian block. Radiolarites are often associated with submarine lavas that are considered to be part of an ophiolitic complex. Radiolarian biochronology of radiolarites cropping out at this zone and at the Vedi ophiolite klippe, combined with petrographic observations and geochemical analyses of associated lavas, helps us to improve our understanding of the geodynamic and paleoenvironmental evolution of this geologically complex region.

We present here results from two outcrops of radiolarian cherts, both dated as Bajocian and containing evidence of subaerial volcanic activity. The first comes from the Sotk pass, east of the Lake Sevan, where a block of radiolarian cherts is incorporated in a mélange. Thin section observations display angular elements of volcanic glass integrated in the background pelagic sediment of the chert.

The second outcrop comes from the Vedi area, where radiolarian cherts lie over pillow lavas of MORB affinity and are overlain by altered variolitic lavas. Fine laminae of volcanic projections (tephra, pyroclastite) are observed in thin sections of the cherts. Volcanic activity contemporaneous to the sedimentation is also suggested by the presence of crystals of sphene fractured at the moment of eruption of titanomagnetite pyroclastites and of laminae composed of fine pyroclastites deformed during the deposition of sediments.

These two cases represent the oldest evidence (Bajocian) of subaerial volcanism in the ophiolites of the Lesser Caucasus. As the youngest currently known evidence of subaerial activity comes from Barremian cherts of the Amasia ophiolite, our results suggest the presence of an intra-oceanic volcanic island arc active for over 50 Myrs in the Tethyan realm that is now preserved in the Lesser Caucasus.

Mots-Clés : Radiolaria, Jurassic, Cretaceous, Tethys, Armenia



Rhaetian (Late Triassic) ostracods (Crustacea, Ostracoda) from the offshore prolongation of North Dobrogean Orogen into the Romanian Black Sea shelf

Marie-Béatrice Forel ^{*1}, Eugen Grădinaru ², Lidija Korat ³

¹ CR2P - Centre de Recherche en Paléontologie - Paris, MNHN- Sorbonne Université-CNRS – France

² Department of Geology, Faculty of Geology and Geophysics, University of Bucharest – Romania

³ Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, Ljubljana – Slovenia

The Triassic has been a turning point in the evolutionary history of marine organisms with the replacement of the Palaeozoic evolutionary fauna by the Meso-Cenozoic one. However, this period remains challenging for ostracods (Crustacea) with the temporary dominance of Platycopida, the explosive radiation of ornate Bairdiidae or the residual occurrence of Paleozoic taxa in deep waters up to the Late Triassic. In that sense, the Triassic ostracod fauna is transitional: neither Paleozoic, nor truly Mesozoic. At the very end of the Triassic, the Rhaetian witnessed the acme of several ostracod families, including Bairdiidae, Cytheruridae and Healdiidae as well as the earliest known occurrences of Progonocytheridae or Cytheridae. This stage preceded the end-Triassic extinction event so that the characterization of assemblages during the Rhaetian is pivotal to provide a baseline to study this key interval.

Rhaetian ostracods are known from several areas worldwide but only rare complete assemblages have been documented to date. Here we describe the first known assemblage of marine ostracods of Rhaetian age from a drill core performed on the Romanian Black Sea shelf. The assemblages developed on an outer shelf with relatively normal marine oxygenation and provide the oldest occurrence of *Pokornyopsis* which demonstrates that this forerunner of modern troglobitic ostracods may not have been troglobitic in the Triassic. The internal structure of Bairdiidae carapaces has been observed by X-ray micro-computed tomography scanning (CT-scan) and characters previously inaccessible allow for the clarification of the taxonomy of this family. Two traces of drill holes of predatory origin add to the oldest known of such records in the Carnian. These traces illustrate the improvement of the abilities of drilling predators on meiofauna from the Carnian to the Rhaetian and further demonstrate that the deep roots of the Mesozoic Marine revolution are to be found in the Triassic.

Mots-Clés : Ostracods, Late Triassic, Romanian Black Sea shelf, predation, CT-scan



La paléobiogéographie des ostracodes (Crustacea) à la transition Frasnien-Famennien

Guillam Elvis ^{*1}, Crasquin Sylvie ¹, Forel Marie-Béatrice ¹

¹ CR2P - Centre de Recherche en Paléontologie – Paris, Sorbonne Université-MNHN-CNRS – France

Au cours des temps géologiques, la vie s'est grandement complexifiée bien qu'elle ait aussi connu de nombreuses et importantes variations de biodiversité. Parmi les déclin, 5 grandes crises du Phanérozoïque (-541.0 ± 1.0 Ma à actuel) sont considérées comme majeures. L'une d'elles marque la limite entre le Frasnien et le Famennien (-372 ± 1.6 Ma). En effet, l'événement Kellwasser a eu un impact majeur sur les écosystèmes marins de la Paléotéthys, particulièrement dans la zone intertropicale.

Les ostracodes, microcrustacés essentiellement benthiques et très diversifiés, sont connus pour leurs grandes capacités adaptatives et sont reconnus comme de bons marqueurs des variations paléoenvironnementales. Ils sont ainsi d'excellents outils pour étudier et comprendre les déclin de biodiversité au cours des crises et la récupération des écosystèmes après ces événements, grâce à leur enregistrement continu.

Afin d'étudier l'impact de l'événement Kellwasser sur ces crustacés dans un cadre global, les données provenant de publications documentant les ostracodes frasnien et famennien ont été compilées afin de suivre l'évolution de leur distribution à la limite Frasnien-Famennien. Ces données sont réparties au sein d'unités géographiques opérationnelles (OGU) afin de prendre en compte les faunes vivant dans une même zone géographique (souvent le même bassin), bien qu'ils puissent avoir vécu dans des milieux différents (substrat, bathymétrie, ...). Cela permet de minimiser l'impact des conditions paléoenvironnementales locales sur les études en paléobiogéographie à grande échelle. L'unité taxonomique choisie ici est le genre car l'identification à ce niveau taxonomique est souvent plus simple et plus fiable. De plus, les espèces d'ostracodes présentent une grande tendance à l'endémisme et beaucoup sont encore en nomenclature ouverte. Les Entomozoidae, en majorité pélagiques, ont une distribution spatiale très étendue à la fin du Dévonien ; ils semblent peu affectés par l'événement Kellwasser et ne sont pas pris en compte. Cette étude s'intéresse aux ostracodes benthiques néritiques.

Mots-Clés : Dévonien Supérieur, Limite Frasnien-Famennien, Ostracodes, Paléobiogéographie.



A high resolution study of middle Eocene radiolarian bioevents from the equatorial Atlantic Ocean (ODP Site 1260, Leg 207)

Mathias Meunier* and Taniel Danelian

Univ. Lille, CNRS, UMR 8198 Evolution, Ecologie et Paléontologie (Evo-Eco-Paléo) – Cité Scientifique, Bât. SN5, 59655 Villeneuve d'Ascq – France

A quantitative radiolarian faunal study was conducted throughout the middle Eocene interval recovered from ODP Site 1260 (Leg 207), drilled on Demerara Rise, a submarine plateau off the coast of Surinam. Paleomagnetic studies establish that the site was situated at the time at

~1° N. The Middle Eocene sequence of site 1260 is made of nannofossil chalk rich in biogenic silica and contains abundant, diverse and well preserved radiolarians. As a high-resolution astronomical timescale exists for the Middle Eocene interval of site 1260, orbitally tuned ages were used to date each studied sample.

The studied material covers a 91.72m thick sequence ranging between 43.77 and 39.83 Ma; it encompasses a transient episode of global warming known as the Middle Eocene Climate Optimum (MECO) that took place between 40.40 and 40.02 Ma. We studied the stratigraphic distribution of 125 radiolarian species, including some rare and sparsely recorded, and we recognized 60 radiolarian events (first and last occurrences, and evolutionary transitions) throughout the studied interval, each one of them dated precisely based on the astronomical timescale available for the site. Our results suggest that radiolarian assemblages crossed the MECO without any major faunal turnover.

In order to evaluate the synchronicity or diachronicity of radiolarian events worldwide, all radiolarian events, including the biozonal datum levels, were dated for site 1260 and compared with the radiolarian record available from several other mid-latitude sites of the North and South Atlantic, as well as some equatorial sites of the Pacific Ocean. Most of these events were found to be substantially diachronous both throughout the Atlantic Ocean and between the equatorial realm of the Atlantic and Pacific oceans.

Mots-Clés : radiolaria, bioevents, diachronism, global warming



Diversification écologique des premiers ostracodes planctoniques au Silurien Supérieur

Vincent Perrier ^{*1}, Gwendal Perrichon ¹, Félix Nesme ¹, Saturnino Lorenzo ²,
Juan Carlos Gutiérrez-Marco ³

1- UMR CNRS 5276 LGLTPE - France

2- Escuela de Ingeniería Minera e Industrial de Almadén-IGeA -

Espagne3- Spanish National Research Council - Espagne

Depuis plusieurs décennies, la faune d'ostracodes myodocopes du Silurien est reconnue comme la première composante planctonique du groupe. Bien que l'événement de colonisation au Silurien moyen (Wenlock-Ludlow) soit bien documenté dans le monde entier, l'évolution de cette faune au Silurien terminal (Pridoli) n'est que très peu connue. Nous décrivons ici, pour la première fois, deux faunes d'ostracodes myodocopes écologiquement distinctes provenant du même horizon dans le centre de l'Espagne (Alcaracejos, district de Cordoue) et datées de la fin du Pridoli (probablement la Biozone à *Istrograptus transgrediens*).

La première faune provient de schistes noirs altérés et comprend cinq espèces de myodocopes associées à des céphalopodes orthocônes, des bivalves et des graptolites. La deuxième faune provient de gros nodules calcaires rougeâtres contenant six espèces de myodocopes associées à des crinoïdes planctoniques (*Scyphocrinites elegans*), des céphalopodes orthocônes, des phyllocarides et des bivalves. Parmi les neuf espèces de myodocopes présentes dans cette localité seules deux sont présentes à la fois dans les schistes et les nodules laissant ainsi penser que ces deux faunes auraient pu avoir des écologies différentes : - l'association faunique des schistes représenterait la faune planctonique de la colonne d'eau ; - tandis que l'association faunique des nodules aurait vécu à proximité des « îles flottantes » créées par les colonies de *Scyphocrinites*. Ces deux faunes occupaient donc probablement des niches écologiques distinctes dans différentes parties de la colonne d'eau.

Mots-Clés : Ostracoda, Myodocopa, plancton, paléoécologie, Silurien



*Intervenant



Exploring the Triassic Panthalassa Ocean: Micropaleontology and Carbonate Sedimentology from Circum-Pacific outcrops

Camille Peybernes ^{1*}, Jérôme Chablais², Nicolo Del Piero ¹, Andrea Fucelli¹,
Eric Heerwagen¹, Giovan Peyrotty¹, Sylvain Rigaud³, Christian Vérard¹,
Rossana Martini¹

¹Department of Earth sciences, University of Geneva, Switzerland.

² Hydro-geo environnement, Geneva, Switzerland

³ Asian School of the Environment, Nanyang Technological University, Singapore

During the Late Triassic all continents were merged into the single supercontinent Pangea, that was surrounded by the immense Panthalassa Ocean. The role of this vast oceanic domain in the global changes and major turnovers that occurred during the Triassic, remains poorly known. Shallow-water carbonate environments, known to thrive with life, are well-developed in the Upper Triassic of Panthalassa. Over the last fifteen years, these overlooked carbonate systems have been investigated for their sedimentological and micropaleontological significance. To better understand the paleoenvironmental conditions that prevailed during the Late Triassic in the Panthalassa, we investigated several localities today distributed all around the Pacific Ocean, in Japan, Russia, Canada, the United States, and Mexico. The same workflow combining field and lithofacies observations, microfacies analysis and biostratigraphy was applied to better constrain the correlations between these different localities, and with their Tethyan counterparts. Depositional models were proposed for each system, in relation to the geodynamic context (i. e., mid oceanic seamounts, island arcs, pericratonic ramps). Micropaleontological inventory including the description of numerous taxonomic groups (e.g., foraminifers, sponges, microproblematica, algae, conodonts...) was carried out. The obtained results significantly strengthen our knowledge of the biodiversity and stratigraphy of these tropical carbonate systems, improve our understanding of biotic evolution, dispersal potential, and paleoenvironmental conditions during the Late Triassic, and also provides significant constraints to test paleogeodynamic reconstructions of the Panthalassa Ocean.

Mots-Clés : Triassic, Panthalassa, Micropaleontology, Carbonate sedimentology, Paleogeography



Paleoproductivity estimates during the PETM using nannofossil absolute abundances

Nicolas Pige ^{*1}, Alessandro Menini ¹, Guillaume Suan ¹, Emanuela Mattioli ^{1,2}

¹ Université de Lyon, UCBL, ENSL, CNRS, LGL-TPE – France

² Institut Universitaire de France – France

The Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM; -56 Ma) is an hyperthermal event likely triggered by a rapid rise in atmospheric CO₂ levels. Until recently, the major drop in CaCO₃ contents recorded across the PETM in deep-sea sediments has been solely attributed to the shoaling of the lysocline and the carbonate compensation depth resulting from the initial carbon injection. This purely chemical model assumes a constant CaCO₃ export and hence steady carbonate paleoproductivity, whereas the abundance of coccolithophores and foraminifera, the two mains pelagic CaCO₃ producers, are highly dependent on the environment they live. This study contributes, thanks to the analyses of the fragmentation and absolute abundance of calcareous nannofossil (coccolithophores and *incertae sedis*) obtained using the settling methods, to quantify the overlooked biological feedbacks on the carbon cycle. A decoupling between the nannofossil accumulation rate and the dissolution is observed at the ODP (Ocean Drilling Program) Site 1263 (South Atlantic) and at the ODP Site 865 (Equatorial Pacific). Our results show that the nannofossil accumulation rate decreased by 80-85% during the PETM at ODP Site 1263 and 120 ka before the PETM at the ODP Site 865. This decrease at ODP Site 1263 is not entirely explained by higher dissolution rates and thus attributed to a drop in primary productivity in the surface ocean. Nanofossil assemblages at ODP Site 865 being characteristic of strongly stratified warm oligotrophic waters, decreased nutrient availability could explain the fall of coccolithophores abundances prior to the PETM. This paleoproductivity decrease during the PETM associated with carbon injection probably led to a rise of the lysocline and carbonate compensation depth. On the longer-term, the alkalinity buildup due to this protracted drop in CaCO₃ export could explain the overshoot recorded during the PETM recovery interval.

Keywords : Carbon cycle, PETM, Coccolithophores, Paleoproductivity, Oceanography



La croissance des coccolithophores et ses contraintes sur la taille des coccolithes

Baptiste Suchéras-Marx^{*1}, Sophie Viseur¹, Charlotte E. Walker², Luc Beaufort¹

¹ Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, Coll France, CEREGE UM34, Aix-en-Provence, France

² University of York, Department of Biology, York YO10 5DD, UK

Les coccolithes sont des petites plaques calcitiques de quelques micromètres de long produites par les coccolithophores. Ces algues photosynthétiques produisent des coccolithes depuis la fin du Trias et sont aujourd'hui des contributeurs majeurs à la production carbonatée marine, et donc au cycle du carbone. Les coccolithes sont particulièrement étudiés dans le registre fossile Méso-Cénozoïque, car ils offrent un cadre biostratigraphique précis et permettent de reconstruire les conditions paléoenvironnementales sur la base du comptage des assemblages ainsi que de la taille des coccolithes. L'aspect biométrique des coccolithes est particulièrement étudié au regard des possibles acidifications lors des crises du cycle du carbone au cours des derniers 200 Ma. Il est souvent admis que, pour un groupe donné, une réduction de la taille des coccolithes peut indiquer une augmentation du stress environnemental. Dans cette étude, nous discutons de la formation des coccolithes au sein de la cellule et de la relation entre la taille de la cellule et du coccolithe. Nous proposons un modèle confirmé par des observations et proposons une modélisation de la répartition de la taille par individu. Nos résultats indiquent que : 1) une cellule peut porter de petits et de grands coccolithes en fonction de son cycle de reproduction, 2) la relation entre la taille de la cellule et du coccolithe n'est valable qu'à un instant de la croissance de la cellule, 3) la présence d'un coccolithe sur une cellule peut être une relique d'une phase de croissance précédente et 4) la distribution des tailles des coccolithes ne correspond pas obligatoirement à une distribution normale. En conclusion, nous discutons des limitations de l'utilisation de la biométrie comme proxy paléoenvironnemental au regard des travaux actuels.

Mots-Clés : coccolithe, coccolithophore, croissance, biométrie, modélisation de croissance, cycle de vie



Calcareous nannofossils reveal the foreign provenance of well-preserved Medieval sculptures in the Ribe Cathedral (Denmark)

Nicolas Thibault^{1*}, Ebbe Nyborg², Finn Surlyk¹

¹ : IGN, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark

² : National Museum of Denmark, Copenhagen, Denmark

The Ribe Cathedral, situated on the West coast of Southern Jutland is the best preserved Romanesque building in Denmark whose first completed construction dates back from 1134. This monument was mainly built from volcanic tufa which was floated from quarries near Cologne (or Köln, North Germany) down the river Rhine and shipped north along the North Sea coast. The tufa stone was too porous for making any artistic sculpture. Another imported stone was used to carve a group of well-preserved decorative corbel figures (or pillar supports). These sculptures take the form of a man carrying a heavy load, illustrating the classical myths of the titan Atlas and are thus named atlantes. Until now, the origin of the Ribe atlantes which have been dated from c. 1250 had remained a mystery. The building stone of the atlantes is a relatively soft chalky and sandy limestone of Late Cretaceous age as we determined in a prior investigation. Deposits of this age are common in Denmark but not with such a coarse facies. A thorough analysis of the calcareous nannofossil assemblage allowed us to date the stone much precisely to the upper Campanian UC15e^{BP} nannofossil subzone. Upper Campanian sandy limestones are exposed in the Münster Basin in North Rhine-Westphalia, western Germany. In particular, the Campanian Baumberger Sandstein in this region fits well with the atlantes in terms of lithology and age, was used as a building stone in the Middle ages and is therefore the only possible provenance of the stone. Given its provenance, the stone was likely floated along the rivers Lippe and Rhine and shipped via the Wadden Sea to Ribe, making it a remarkably long transport distance for historic commercial stone transportation in northern Europe during the High Middle Ages.

Keywords : Late Campanian, calcareous nannofossils, Ribe Cathedral, Medieval sculpture, Baumberger Sandstein



T13.2 Mammifères cénozoïques, climat et biogéographie





Feeding ecology of European Early Pleistocene Deer: what does it tell us about their paleoenvironmental context?

Emilie Berlioz ^{*1,2}, Dimitri Kostopoulos ³, Cécile Blondel ², Gildas Merceron ²

¹ TRACES – CNRS & University : UMR5608 - France

² PALEVOPRIM – CNRS & University : UMR7262 - France

³ Department of Geology – School of Geology – Faculty of Science of Thessaloniki – Greece

Cervids represent a major component of the European Early Pleistocene fauna. In paleoenvironmental reconstructions, deer are typically considered as tree-cover indicators. However, insights into the ecology of extant deer uncover a wide variety of feeding behaviors and occupied habitats. *C. elaphus* is indeed present from the arid Spanish dehesas, consuming up to 95% of herbaceous monocotyledons, to the polish primeval forests, behaving as a strict browser. The trophic plasticity of *C. elaphus* reflects the principal resources available in the habitat. Exploring the feeding behavior of extinct eurytopic cervids hence constitutes a key to better apprehend paleoenvironments and their variations through time.

By reflecting what has eaten an animal during the last few days or weeks of its life, dental microwear textures of herbivores constitute a bridge between a population and its environment. 211 *E. ctenoides* and 176 *M. rhenanus* from 11 Early Pleistocene European localities were analyzed via a Dental Microwear Texture Analysis coupled with a Scale Sensitive Fractal Analysis (DMTA-SSFA).

Results illustrate the diversity of the food categories the 2 taxa are able to consume: either dicot foliage, seeds or tough and abrasive monocots. The 2 deer are therefore eurytopic and constitute appropriate proxies to track vegetal resource availability in paleoenvironments. For some localities, our results corroborate previous paleoenvironmental interpretations. For others, it brings new perspectives. Similar oscillations through time were identified for the 2 deer between a browsing and a grazing diet. We propose that these results witness vegetation changes from steppic habitats to decidual forests induced by the Early Pleistocene glacial- interglacial oscillations.

This large scale work challenges the paradigm considering deer as a paleoenvironmental indicator of an important tree cover and modifies our vision of the paleoenvironments of several European Early Pleistocene localities.

Mots-Clés : Dental Microwear Texture Analysis (DMTA), cervid, feeding ecology, trophic plasticity, paleoenvironmental reconstructions, Europe



L'évolution des Hippopotamidae et les changements environnementaux globaux à régionaux : nouvelles avancées en Afrique orientale au Néogène récent

Jean-Renaud Boisserie ^{*1,2}

¹ Laboratoire Paléontologie Évolution Paléoécosystèmes Paléoprimatologie – CNRS et Université de Poitiers – France

² Centre Français des Études Éthiopiennes – CNRS et Ministère de l'Europe et des affaires étrangères – Éthiopie

Les grands herbivores semi-aquatiques ont constitué une guildes fleurissante pour les mammifères cénozoïques, incluant de nombreuses familles dans plusieurs ordres. La famille des Hippopotamidae en a constitué le dernier avatar significatif.

Malgré un contexte à priori moins favorable à partir d'un Miocène récent plus aride, cette famille a été particulièrement diversifiée en Afrique et a laissé un impressionnant registre fossile dans la seconde moitié du Néogène, suggérant une omniprésence dans les écosystèmes de ce continent. L'Afrique orientale, notamment, fournit des clefs importantes pour mieux comprendre les grandes étapes de leur évolution morphologique. Cette présentation concernera quelques avancées obtenues récemment dans cette région.

Tout d'abord, la description de nouveaux restes de Napudet (Miocène moyen, Kenya) et de Chorora (Miocène récent, Éthiopie) ont permis de mieux documenter l'évolution mandibulaire et dentaire qui a accompagné « l'événement hippopotaminé ». Il s'agit de la mise en place soudaine de la sous-famille la mieux connue et la plus abondante, conjointement à l'expansion des plantes en C₄ en Afrique.

Ensuite, la révision du matériel de Kanapoi (Pliocène ancien, Kenya) a permis de mettre en lumière une phase de faible endémicité pendant le Pliocène. Cette phase semble avoir pris fin de manière contemporaine à l'épisode glaciaire du MIS M2.

Enfin, les hippopotamidés des formations du bassin du Turkana (en Éthiopie et au Kenya) présentent au cours du Plio-Pléistocène une histoire endémique caractérisée par des séquences évolutives inhabituelles. Cette histoire semble découplée des dynamiques climatiques globales, et plutôt en ligne avec certains épisodes du rifting de cette dépression.

Une meilleure compréhension des mécanismes évolutifs ayant présidé à ces différentes phases passe par une caractérisation approfondie de la paléoécologie des différentes espèces. Elle permettra également la prise en compte des interactions biotiques.

Mots-Clefs : Hippopotamidae, diversité, paléobiogéographie, phylogénie, facteurs environnementaux



Study of the endocast anatomy of two hyaenodonts: the large *Pterodondayuroides* and the tiny *Thereutherium thylacodes* (Hyainailouroidea)

Morgane Dubied^{1*}, Floréal Solé², Sandrine Ladevèze³ and Bastien Mennecart^{4,5}

¹ Biogéosciences, UMR 6282, Université de Bourgogne Franche-Comté, France

² D.O. Earth and History of Life, Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Belgique

³ Centre de Recherche en Paléontologie – Paris (CR2P, UMR 7207) – CNRS/MNHN/Sorbonne Université – Muséum national d'Histoire naturelle, France

⁴ Natural History Museum Basel, Suisse

⁵ Natural History Museum Vienna, Autriche

We present here the endocast reconstructions of *Thereutherium thylacodes* and *Pterodon dasyuroides* – two hyaenodonts from Europe (Quercy Phosphorites, France) – based on two skulls housed in the *Muséum national d'Histoire naturelle* (Paris, France). *Pterodon dasyuroides* is a large hyaenodont (52 kg) from the late Eocene, while *Thereutherium thylacodes* is a tiny hyaenodont (200 g) recorded in the Oligocene.

We focused on the morphology of certain endocranial structures such as the cerebrum (complexity of the encephalon) and cerebellum (vermis fragmentation). We compared our two endocast reconstructions with those of several other hyaenodonts, notably the ones recently published for *Proviverra typica* and *Eurotherium theriodis*. Furthermore, we also compared *Thereutherium* and *Pterodon*, both belonging to Hyainailouroidea (a hyaenodont group that diversified mostly in Africa) with members of the Hyaenodontidea, which were successful in Eurasia. Finally, we used phylogenetic trees to contextualize the evolution of endocranial size and complexity in Hyaenodonta.

Our study shows that several endocranial structures appeared convergently among Hyaenodonta, together with a complexification over time. Therefore, endocranium is not usable to infer systematic interpretations. Elsewhere, the complexification of the endocranium and the analysis of the encephalization quotient do not support the idea of a relatively small brain size in hyaenodonts (hypothesis often suggested to explain their extinction).

Mots-Clés : Eocene, Oligocene, Hyaenodonta, endocranium, phylogeny



Pistes et empreintes de mammifères de l'Oligocène inférieur de Saignon (Bassin d'Apt, Vaucluse)

Emmanuel Fabre ¹, Matteo Beveledere ², Stéphane Legal ³, Pauline Coster ^{*3}

¹ Geosciences Rennes – Université de Rennes 1 – France

² Università degli Studi di Firenze – Dipartimento di Scienze della Terra – Italie

³ Réserve naturelle nationale du Luberon, Parc naturel régional du Luberon – France

Le gisement de Saignon, situé dans la formation des Calcaires de La Fayette du bassin d'Apt, a livré une très grande densité d'empreintes avec des centaines de traces de pas de mammifères et pistes préservées. L'ichnofaune de Saignon, datée du Rupélien (MP21), se situe à un âge de transition important succédant à la Grande Coupure. Cet ichnosite, découvert dans une ancienne carrière, a d'abord été étudié dans les années 80. Une nouvelle analyse du site a été réalisée afin de poursuivre le travail ichnologique commencé à l'aide de nouvelles méthodes.

La surface du banc calcaire portant les empreintes a été numérisée par photogrammétrie aérienne (drone). Certaines empreintes et pistes sélectionnées ont été numérisées par des techniques photogrammétriques à courte portée. Les données 3D ont servi de base pour toutes les mesures, y compris des mesures de profondeur précises. Parmi les centaines de pistes présentes, cette étude s'est concentrée sur les pistes de périssodactyles et d'artiodactyles les mieux conservées. Les analyses ont permis de réviser l'ichnotaxonomie du plus grand morphotype de périssodactyles attribué à *Rhinoceripeda*. Malgré le plus faible nombre d'empreintes présentes, la présence d'un deuxième ichnotaxon plus petit de périssodactyle, *Lophiopus* isp., a été identifiée. Les empreintes d'artiodactyles ont été attribuées à *Bifidipes velox*.

Les nouvelles données paléoichnologiques collectées sur le site de Saignon conjuguées aux données sédimentologiques fournissent plus d'informations sur le contexte paléontologique et paléoécologique du Sud-Est de la France à la transition Éocène-Oligocène et montrent le potentiel des futures études ichnologiques dans le Luberon.

Mots-Clés : ichnologie, empreintes, paléontologie, Oligocène, mammifères, paléoécologie



Biorégions des mammifères néogènes et pleistocènes de l'Ancien Monde : évolution temporelle et spatiale

Corentin Gibert ^{*1}, Axelle Zacaï¹, Olivier Chavasseau¹, Ghislain Thiery¹, Camille Grohe¹, Gilles Ramstein², William Banks³, Olga Otero¹

1. *Laboratoire Paléontologie Evolution Paléoécosystèmes Paléoprimatologie (PALEVOPRIM), UMR-CNRS 7262, Université de Poitiers, France*

2. *Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE/IPSL, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay, France*

3. *Laboratoire « de la préhistoire à l'actuel : culture, environnement et anthropologie » (PACEA), UMR5199, Université de Bordeaux, France*

La production de biorégion est une pratique remontant aux travaux de Wallace et Engler à la fin du 19^{ème}, néanmoins elle est toujours une pratique très utile pour calculer un large spectre d'indices de biodiversité et pour observer les variations temporelles ou spatiales de sa distribution. Cependant, la production de biorégions en paléontologie est généralement une analyse secondaire, utilisée pour suivre l'évolution de la distribution d'un groupe particulier, sur la base d'une échelle de temps subjective adaptée à la question étudiée. Par conséquent, les biorégions produites pour décrire l'évolution des Mammifères néogènes et pleistocènes de l'Ancien Monde ont été calculées à l'aide d'un large éventail de méthodes, d'échelles géographiques et temporelles.

Cette hétérogénéité limite notre observation et notre compréhension de la dynamique spatiale de la biodiversité des Mammifères en temps profond, d'autant plus que les indices de biodiversité dépendent des échelles spatiales utilisées pour les calculer.

C'est pourquoi nous fournissons ici un cadre biogéographique cohérent, basé sur une approche comparative de différentes méthodes de reconstruction, à l'échelle spatiale de l'Ancien Monde puis à l'échelle des continents africain, asiatique et européen sur l'ensemble du Néogène et du Pleistocène. Ce cadre géographique cohérent dédié à l'étude de la biodiversité des Mammifères en temps profonds est basé sur un découpage temporel objectivé par des analyses de poly-cohortes. Grâce à elles, nous identifions cinq grandes faunes évolutives se succédant de manière quasi synchrone sur tous les continents de l'Ancien Monde. Pour chacune de ces faunes, nous proposons entre 2 et 7 biorégions à l'échelle globale puis pour chaque continent. La production d'un nombre minimal de biorégions permet notamment d'observer les structures biogéographiques majeures et leurs évolutions temporelles, comme le passage d'une structuration longitudinale à latitudinale des biorégions de mammifères européens à la fin du Miocène, ou l'affinité à long terme des faunes du sud de l'Asie avec les faunes africaines. En proposant des biorégions de tailles et de nombres variés, il devient possible d'observer l'évolution des mammifères de l'Ancien Monde en produisant des valeurs d'indices de biodiversité comparables sur les 23 derniers millions d'années.

Mots-Clés : Mammifères, Néogène, Miocène, Pliocène, Pleistocène, Biorégion, Région biogéographique, indice de biodiversité, poly-cohorte, faune évolutive, chronofaune, Ancien Monde.



Les loutres du Plio-Pléistocène de la basse vallée de l'Omo, Sud-Ouest éthiopien, et paléoécologie des loutres fossiles géantes d'Afrique

Camille Grohé ^{*1}, Kevin Uno ², Jean-Renaud Boisserie ^{1,3}

¹ Laboratoire Paléontologie Évolution Paléoécosystèmes Paléoprimatologie (PALEVOPRIM, UMR 7262 CNRS/INSU), Université de Poitiers – France

² Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University, Palisades, NY – Etats-Unis d'Amérique

³ Centre Français des Études Éthiopiennes (CFEE, USR 3137 CNRS INSHS), Ministère de l'Europe et des affaires étrangères, Addis-Abeba – Éthiopie

Nous décrivons des restes de loutres du Plio-Pléistocène des formations d'Usno et de Shungura, situées dans la basse vallée de l'Omo, au Sud-Ouest de l'Éthiopie. Des carnassières inférieure et supérieure, datées d'environ 3,3 Ma, appartiennent à une loutre piscivore du genre *Torolutra*, de taille similaire à une loutre de rivière actuelle. Des dents isolées, des fragments de mandibules, et un fémur datés entre 3,4 Ma et 2,5 Ma, appartiennent à une nouvelle espèce de loutre bunodonte (aux dents « broyeuses ») du genre *Enhydriodon*. Enfin, un humérus d'une loutre indéterminée, daté d'environ 1.9 Ma - 1,8 Ma, représente la dernière occurrence de cette sous-famille de carnivores dans l'Omo.

Le genre *Enhydriodon*, très abondant dans les sites à australopithèques du Rift Est-Africain, contient environ six espèces dans cette région. Leur taille et leur degré de spécialisation dentaire vers un régime alimentaire durophage augmentent du Miocène supérieur au Pléistocène inférieur. Les formes les plus récentes, comme celle de l'Omo, pouvaient peser jusqu'à 200 kg. Nous avons analysé les isotopes stables de l'oxygène et du carbone de l'email dentaire d'*Enhydriodon* de l'Omo afin d'estimer son degré d'aquaticité et son régime alimentaire. Nos résultats suggèrent que ces loutres géantes étaient terrestres et devaient consommer des proies aquatiques et terrestres, acquises par la chasse ou le charognage.

La nouvelle espèce d'*Enhydriodon* de l'Omo est proche-parente d'*E. dikikae*, présente dans la région de l'Afar et probablement dans l'Ouest du bassin du Turkana (Kanapoi) dès le Pliocène ancien.

Elle représente l'une des dernières occurrences de ce genre de loutres gigantesques en Afrique. Leur extinction, vers 2 Ma, est contemporaine à celles de nombreux carnivores de grande taille (>21.5 kg) et possédant des niches écologiques très spécialisées. Elle pourrait être liée aux changements géologiques, climatiques, et biotiques majeurs qui affectent le Rift Est-Africain au Pléistocène ancien.

Mots-Clés : Carnivora, Lutrinae, Éthiopie, Pliocène, Pléistocène, Isotopes, Gigantisme



Divergence tardive entre chameau et dromadaire, registre fossile, molécules, et la dispersion des camélidés vers l'Ancien Monde

Michel Laurin ^{*1}, Gilles Didier ², W. Andrew Barr ³, Denne Reed ⁴ et
Denis Geraads ¹

¹ CR2P-UMR 7207, CNRS, MNHN, UPMC, Sorbonne Université, France

² IMAG, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, France

³ Center for the Advanced Study of Human Paleobiology, Department of Anthropology, The George Washington University, Washington DC, USA

⁴ Department of Anthropology, University of Texas at Austin, USA

Les dates de divergence estimées par les molécularistes sont souvent bien plus anciennes que celles estimées par les paléontologues. Nous illustrons un exemple extrême de ce phénomène avec les camélidés de l'Ancien Monde. Les études moléculaires récentes estiment l'âge de la divergence entre chameau et dromadaire (*Camelus*) entre 4 et 8 Ma, alors que le registre fossile suggère un âge inférieur à 1 Ma. Le plus ancien fossile de camélide dans l'Ancien Monde (*Paracamelus*) date d'environ 6,3 Ma, et une interprétation littérale du registre fossile suggère que les camélidés sont arrivés dans cette région, par le détroit de Béring, peu avant. Certaines estimations moléculaires suggèrent donc une divergence entre chameau et dromadaire antérieure à l'immigration des camélidés dans l'Ancien Monde, alors que ni *Camelus* ni *Paracamelus* ne sont connus en Amérique du Nord.

Une datation paléontologique de la divergence entre chameau et dromadaire a donc été entreprise. Elle s'appuie sur une compilation de l'âge de l'ensemble des niveaux fossilifères des camélidés de l'Ancien Monde, sur des données phylogénétiques, et sur le modèle de naissance et de mort avec fossiles (« Fossilized Birth-Death Process » en anglais) implémenté dans un logiciel que l'un de nous (GD) a récemment développé. L'analyse de ces données, comportant 38 occurrences stratigraphiques, suggère que la divergence entre chameau et dromadaire date d'environ 1 Ma. De plus, la densité de probabilité des âges de divergence permet d'exclure que cette date soit antérieure à 2 Ma (l'intervalle de confiance à 95% va de 0,74 à 1,82 Ma selon les arbres considérés). Ceci résout le paradoxe soulevé par certaines études moléculaires récentes : le chameau et le dromadaire se sont bien différenciés longtemps après l'arrivée des camélidés dans l'Ancien Monde. Nous identifions des erreurs de calibration qui semblent être responsables des âges exagérés obtenus dans les études moléculaires. Il n'y a donc pas de conflit entre les signaux paléontologique et moléculaire, contrairement à ce que la simple confrontation des résultats pourrait suggérer.

Mots-Clés : Registre fossile, camélidés, datation moléculaire, stratigraphie, datation paléontologique



Biogeographic mechanisms involved in the colonisation of Madagascar by African vertebrates: rifting, rafting and runways

Judith C. Masters^{1,2}, Fabien Génin³, Yurui Zhang⁴, Romain Pellen³, Thierry Huck⁴, Paul P. A. Mazza⁵, Marina Rabineau⁶, Mactar Doucouré³ and Daniel Aslanian^{7*}

¹ Department of Zoology & Entomology, University of Fort Hare, Alice, South Africa.

² Department of Botany & Zoology, Stellenbosch University, Stellenbosch, South Africa.

³ AEON, Earth Stewardship Science Research Institute, Nelson Mandela University, Port Elizabeth, South Africa. ⁴ IFREMER, UnivBrest, CNRS, IRD, Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale (LOPS), UMR 6523, IUEM, 29280 Plouzané, France

⁵ Department of Earth Sciences, University of Florence, via La Pira 4, 50121 Florence, Italy

⁶ CNRS, UnivBrest, Université Bretagne-Sud, Laboratoire Géosciences Océan (LGO), UMR 6538, IUEM, F-29280 Plouzané, France

⁷ Laboratoire de géodynamique et d'enregistrements sédimentaires, REM M L S, Institut Français de Recherche pour l'Exploration de la Mer (IFREMER), Plouzané, France

Madagascar's vertebrate fauna shows a complex biogeographic pattern that confounds generalisations developed from other islands. For 80 years popular opinion has held that most of Madagascar's terrestrial vertebrate fauna arrived via transoceanic dispersal (i.e. by rafting or swimming), chiefly from Africa. The Ali-Huber model proposed a jet-like eastward Palaeogene currents which would allow animals to reach Madagascar in 3 – 4 weeks (through hibernation), whilst others like hippopotamuses are supposed to swim across the Mozambique Channel. We re-investigated the Ali-Huber model by tracking particle trajectories in currents simulated using the Institut Pierre-Simon Laplace Earth System Model, under similar palaeo-geographic constraints and showed that the model considerably underestimated the time required to cross the Mozambique Channel under simulated palaeo-geographic conditions. Moreover, hibernation is probably an adaptation to Madagascar's hypervariable climate, and of doubtful value to waif mammalian colonists. In an other hand, due to their limited aquatic abilities and their physiology, hippopotamuses would not have been capable of crossing the Mozambique Channel by swimming.

Therefore we explored the possibility of geodispersal via short-lived land bridges between Africa and Madagascar. We reviewed recent geological results collected in the Mozambique Channel, and compiled three palaeo-sedimentological maps using PLACA4D. Geological data indicate three short-lived land bridges between Africa and Madagascar at 66-60 Ma, 36-30 Ma, and 12-05 Ma.

Mots-Clés : Madagascar's vertebrate fauna, Rafting, Landbridge, Topodynamic



Combining fossil enamel stable isotopes and dental microwear texture analysis to assess dietary niche-partitioning among primates (Cercopithecidae and Hominidae) from the Lower Omo Valley, Ethiopia.

Gildas Merceron^{1*}, Kevin T. Uno², Morgan Brown³, Franck Guy¹, Leslea Hlusko⁴, Jeremy E. Martin⁵, Vincent Balter⁵, Antoine Souron⁶, Jean-Renaud Boisserie^{1,7}

¹ PALEVOPRIM, CNRS and University of Poitiers, France

² Division of Biology and Paleo Environment, Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University, USA ³ Department of Ecology, Evolution and Environmental Biology, Columbia University, USA

⁴ Department of Integrative Biology, University of California, Berkeley, USA

⁵ University of Lyon, ENSL, Univ Lyon 1, CNRS, LGL-TPE, F-69007 Lyon, France ⁶ PACEA, University of Bordeaux and CNRS, France

⁷ CFEE, CNRS and Ministry of Europe and Foreign Affairs, Ethiopia

The fossil record from the Shungura Formation in the Lower Omo Valley, Ethiopia, includes several species of primates. Diet is an important aspect to assess niche partitioning. Here, we combine stable isotope analysis and dental microwear texture analysis (DMTA) of hominid and cercopithecoid molars to study dietary partitioning. We focus on the period from ~2.3 to 2.0 Ma because of the high taxonomic diversity. Cercopithecoids are represented by *Theropithecus*, *Papio*, and the colobines *Paracolobus* and *Rhinocolobus*, and hominids by *Australopithecus*, *Paranthropus*, and *Homo*.

We developed a DMTA-based dietary morphospace using PCA of 20 textural characteristics on a dataset of four extant primate species (n=104) with different diets. In the DMTA morphospace, fossil *Theropithecus* (n=44) falls near its extant congener, the gelada, whereas fossil *Papio* (n=32) lies closer to modern vervets than their extant counterparts. Smaller sample sizes of the colobines (n=9) show the extinct *Rhinocolobus* had a diet most similar to the arboreal *Colobus guereza* whereas the terrestrial *Paracolobus* had a highly variable diet, including hard objects. For the hominids, DMTA data show no evidence of durophagy. The diet of *Paranthropus* (n=10) falls closest to that of *Theropithecus*. Smaller data sets for *Homo* (n=4) and *Australopithecus* (n=2) suggest variable diets that fall farther outside of the extant primate morphospace compared to *Paranthropus*.

Carbon isotope data show that *Paranthropus* (n=18) and *Theropithecus* (n=19) both had C₄-dominated diets, thus overlapping in both isotopic and DMTA space. *Papio* (n=11) shows a high range of $\delta^{13}\text{C}$ values, mirroring the diversity in the DMTA PC1. The diet of *Homo* (n=10) spans C₃- to nearly C₄-dominated values and overlaps considerably with *Paranthropus*. *Australopithecus* (n=4) has a wide $\delta^{13}\text{C}$ range; colobines (n=9) have C₃ diets, but based on DMTA results, sourced different foods.

Mots-Clés : Africa; primates; ecology; Pleistocene; teeth



Taxinomic revisions of Plio-Pleistocene suids from northern Africa: implications for biochronology and paleobiogeography

Antoine Souron ^{*1}, Karl Baltazart ^{*1}, Jean-Luc Guadelli ¹, Tsegai Medin ², Deming Yang ³

¹ UMR 5199, PACEA (De la Préhistoire à l'Actuel : Culture, Environnement et Anthropologie), Bordeaux – France

² Archaeological Heritage Research Branch, Commission of Culture and Sports of Eritrea, Asmara – Érythrée

³ Stony Brook University, Stony Brook – États-Unis d'Amérique

Plio-Pleistocene suids from northern Africa are frequently discussed as evidence for biochronological correlations of hominid-bearing sites and dispersals of fauna from Africa to Eurasia. Here we use classic comparative anatomy and morphometrics of craniomandibular and dental remains, supplemented with investigations of internal structures using CT scan, to revise suid material from northern Africa. Main results are summarized here. 1) Three different lines of evidence (craniomandibular, petrosal, and dental morphology) strongly align the abundant material from Ahl al Oughlam, Morocco, with the genus *Metridiochoerus* rather than *Kolpochoerus*. 2) The type material of *Omochoerus maroccanus*, an upper fourth premolar and an upper third molar from unknown stratigraphic context in Morocco, also shares dental similarities with the suid from Ahl al Oughlam and therefore aligns with the genus *Metridiochoerus*. Other possible occurrences of *O. maroccanus* in northern Africa either represent *K. limnetes* (Mansourah, Algeria) or *K. majus* (Thomas Quarry, Morocco). 3) A single unworn upper third molar from Thomas Quarry, level L, was previously attributed to *Kolpochoerus* cf. *maroccanus*. Internal and external dental morphology and metrics are similar to that of specimens of *K. majus* from eastern African sites dated to ca. 1 Ma (Daka Member, Bouri Formation, Ethiopia; Buia, Eritrea), suggesting a paleobiogeographic connection between the two regions some time before 1 Ma. Other fossils from northern Africa could belong to this species (e.g., Erg Tihodaïne, Algeria). 4) Abundant warthog (*Phacochoerus*) fossils from Allobroges (Algeria) reveal a combination of craniomandibular and dental characters that is unknown in other African sites, potentially representing a different, new species. This list of taxinomic revisions highlights the crucial contribution of taxinomy to document paleobiodiversity and investigate broader evolutive and paleoenvironmental research questions.

Mots-Clés : Suidae, taxinomy, biogeography, biochronology, *Kolpochoerus*, *Metridiochoerus*, *Phacochoerus*



Maximum Thermique du Paléocène-Eocène et renouvellement faunique des mammifères en Europe : un nouveau site des Corbières (Aude, Occitanie) ébranle les scénarios paléobiogéographiques

Rodolphe Tabuce ^{*1}, Corentin Noiret ², Bernard Marandat ¹, Sylvain Adnet ¹, Laurent Marivaux ¹, Monique Vianey-Liaud ¹, Johan Yans ²

¹ ISEM, Université de Montpellier, CNRS, IRD, EPHE, Montpellier, France

² Département de Géologie – Institute of Life, Earth and Environment, Université de Namur, Belgique

Le Maximum Thermique du Paléocène-Eocène (PETM, ~56 Ma) est l'événement hyperthermique le plus marquant du Cénozoïque. Cette perturbation climatique majeure, rapide et de forte amplitude (augmentation de 5-8°C des paléotempératures globales) est souvent considérée comme le meilleur analogue géologique au réchauffement actuel de la biosphère. Le PETM a ainsi profondément impacté les écosystèmes marins et terrestres. Sur les continents holarctiques, en favorisant la mise en place de forêts tropicales sous les hautes latitudes, le PETM a permis des dispersions intercontinentales rapides de plusieurs groupes de mammifères. Inversement, plus localement, le PETM aurait initié de forts provincialismes aux niveaux spécifique et générique ; c'est le cas en Europe. A l'échelle de ce continent, nos connaissances restent toutefois disparates et limitées. Dans la bioprovince du sud-ouest européen (Portugal, Espagne et Sud de la France), le registre fossile juste avant le PETM est ainsi limité à de rares faunules découvertes en Espagne ; les sites de l'Eocène inférieur sont plus nombreux et riches, particulièrement dans le sud de la France, mais ils restent mal contraints par rapport au PETM.

La découverte récente par notre équipe d'un site dans les Corbières audoises à la faune diversifiée et précisément datée par chémostratigraphie ($\delta^{13}C_{org}$) juste avant le début du PETM est par conséquent un jalon important. A ce jour, 14 espèces de mammifères y sont documentées. Si la présence de certains taxons (adapisoriculidés, nyctithériidés et condylarthres lousinidés) n'est pas surprenante pour un site du Paléocène terminal, la découverte de rongeurs, d'un marsupial herpétothériidé, d'un créodonte, d'un plésiadapiforme paromomyidé et d'un possible pseudorhyncocyonidé est inattendue. Cette faune documente ainsi les premiers rongeurs européens avérés (à ce jour seules des incisives fragmentaires étaient connues du Paléocène terminal du Bassin de Paris et de Roumanie). De même, la faune documente les premiers herpétothériidé, créodonte et paromomyidé du Paléocène terminal européen. Tous ces taxons ont une affinité nord-américaine. Jusqu'à présent, leur première occurrence en Europe dans des sites syn- et post-PETM laissait penser que cet événement climatique avait favorisé leur dispersion depuis l'Amérique du Nord. Nous montrons au contraire que l'arrivée en Europe de ce cortège faunique serait tout juste antérieure au PETM et sans lien direct avec ce réchauffement.

Mots-Clés : PETM, Europe, mammifères, paléobiogéographie



T13.3 Evolution de la vie au cours de la transition Précambrien-Paléozoïque : biodiversifications et facteurs environnementaux



Post-Ordovician dynamics of trilobites as exemplified by evolutionary faunas

Valentin Bault^{1*}, Catherine Crônier¹, Diego Balseiro² and Claude Monnet¹

¹UMR 8198 – Evo-Eco-Paleo, Université de Lille, France

²CICTERRA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

Trilobites appeared with the Cambrian explosion with several other clades. They became quickly abundant and successfully invaded different environments. They reached their maximum diversity during the Ordovician but the Hirnantian glaciation severely affected this emblematic early Palaeozoic fauna leading to the disappearance of many orders and families. However, trilobites remained diversified after the crisis and other important diversity changes occurred later in the Palaeozoic. Using the factor analysis approach of Sepkoski, we identified the different evolutionary faunas of post-Ordovician trilobites to highlight the different key periods in their late history and the impact of ecological changes. During the Silurian, the Ordovician families that survived the Hirnantian extinction dominated the trilobite fauna. This evolutionary fauna prospered until the Devonian but was progressively replaced by another one. Indeed, the development of vast epicontinental seas during the Early Devonian led to the most important diversification of trilobites since the Ordovician with the radiation of several families. The Middle and the Late Devonian events strongly affected trilobites both ecologically and taxonomically. During this critical period, another fauna developed, the only one linked to a decrease of diversity and not to a diversification. In response to environmental stresses, Late Devonian trilobites showed morphological and ecological particularities such as eye reduction and deep living behaviour. Finally, a latest evolutionary fauna occurred during the Carboniferous and the Permian but it did not recover an important taxonomic diversity, despite a diversification in the Mississippian before disappearing at the end of the Permian.

Throughout their evolutionary history, trilobites suffered from environmental changes such as sea-level changes, anoxic events, or temperature changes, but also ecological changes with the development of other clades. These changes shaped their diversity both positively with several diversifications but also negatively with extinction events.

Keywords : Palaeozoic, Trilobites, Diversification, Environmental changes, Factor analysis



Early Paleozoic radiolarian diversity dynamics in the context of the Great Ordovician Biodiversification Event

Taniel Danelian ^{*1}, Claude Monnet ¹

¹ Univ. Lille, CNRS, UMR 8198 Evolution, Ecologie et Paléontologie (Evo-Eco-Paléo) – Cité Scientifique, Bât. SN5,59655 Villeneuve d'Ascq - France

Based on a new and exhaustive sample-based dataset of middle Cambrian to Silurian radiolarian occurrences we investigate the diversity patterns of all radiolarian species to find out trends in their taxonomic evolution and to evaluate possible biases influencing these patterns. We also review the long term radiolarian biotic changes in the context of the Great Ordovician Biodiversification Event (GOBE) and associated global changes that affected the Earth system at the time. The Cambrian–Ordovician interval is characterized by a protracted diversification trend peaking in the Darriwilian. The rising trend is initially produced during the Tremadocian by Archaeospicularian radiolarians and it may be partly correlated with the basal Ordovician “plankton revolution”. Subsequently, the radiolarian diversity increase is mainly due to Spumellarian and Entactinarian radiolarians; the Darriwilian peak is the highest for the entire studied interval; it reflects a profound turnover in Ordovician radiolarian plankton assemblages. The Darriwilian appears to be a “game changing” interval for radiolarians and it is likely due to the profound oceanographic changes that followed the early Darriwilian cooling trend of Earth’s climate. The transition with the Silurian is separated and highlighted by a late Ordovician large drop in diversity, which records the lowest taxonomic richness of the studied interval. Next, the Silurian is first characterized by a rapid protracted recovery culminating in the Aeronian, and, secondly, by another peak in richness recorded in the Gorstian. Our results suggest that radiolarian microzooplankton have responded during all the major diversity events of the marine biosphere recognized for the early Paleozoic. However, although the long-term trends in radiolarian biodiversity are robust, the documented patterns remain partly and locally biased by uneven sampling through space and time.

Mots-Clés : Radiolaria, Paleobiodiversity dynamics, Early Paleozoic, Great Ordovician Biodiversification Event



Mode alimentaire et locomotion chez les premiers animaux de l'Ediacarien de Russie (Mer Blanche ; env. 555 Ma)

Aude Gounelle ^{1*} et Jean Vannier ¹

¹Univ Lyon, Univ Lyon 1, ENSL, CNRS, LGL-TPE, F-69622, Villeurbanne, France

Des formes de vie macroscopiques complexes et diversifiées sont apparues à la fin du Précambrien (Ediacarien), bien avant les premières biodiversifications animales du Cambrien. Même si leur anatomie et leur fonctionnement restent encore énigmatiques et controversés, il s'agit très probablement d'eumétazoaires comme l'indiquent certains biomarqueurs organiques (Bobrovsky et al. 2018), leur symétrie bilatérale et leur polarité corporelle. Les gisements exceptionnels de la Mer Blanche constituent la meilleure source d'information connue à ce jour pour reconstituer l'anatomie et le fonctionnement de ces animaux primitifs. Nous présentons ici les résultats préliminaires d'une étude menée en collaboration avec des chercheurs russes du Palaeontological Institute de Moscou et qui vise à tester les hypothèses proposées concernant leur paléobiologie. Nos recherches portent sur de grandes dalles de roche présentant de nombreuses empreintes à leur surface : celle des organismes eux-mêmes (ex : *Yorgia waggoneri*), enfouis sur place suite à l'arrivée subite de sédiment, et leurs traces d'activité successives à la surface du tapis microbien avant leur mort. Les analyses qualitatives et quantitatives montrent clairement que ces empreintes forment des pistes faites d'une succession 1) d'états stationnaires de l'animal probablement liés à une prise de nourriture à partir du tapis microbien, et 2) de phases de locomotion (« ciliary gliding » ou glissement par mouvements ciliaires sur une substance muqueuse) non enregistrées dans le sédiment. L'étude de ces empreintes permet donc d'affirmer que certains animaux précambriens se déplaçaient par mouvements ciliaires et/ou musculaires, mais également de reconstituer leur face inférieure qui semble jouer un rôle clé dans la dissolution enzymatique du tapis microbien et l'assimilation des nutriments. Nous réévaluons les modèles précédemment proposés à la lumière de possibles équivalents actuels, notamment les placozoaires (métazoaires basaux) qui ne possèdent pas d'appareil digestif et se nourrissent par digestion externe. L'origine mécanique (impression du relief de la face ventrale) ou chimique (dissolution localisée du tapis microbien) des empreintes observées est également testée.

Mots clé : Précambrien, Ediacarien, Russie, Mer Blanche, locomotion, mode alimentaire, *Yorgia*.



La diversification des échinodermes à l'Ordovicien : tentative de décryptage d'un signal global complexe

Bertrand Lefebvre ^{1*}

¹ Univ Lyon, Univ Lyon 1, ENSL, CNRS, LGL-TPE, F-69622, Villeurbanne, France

Au cours de l'Ordovicien, le phylum des échinodermes est caractérisé par sa plus importante diversification de tout le Phanérozoïque, à la fois en terme de diversité et de disparité morphologique : 15 classes y sont représentées au lieu de 5 à la fin du Cambrien (Furongien) ou encore dans les mers actuelles. L'analyse globale de la distribution spatio-temporelle de près de 2000 taxons provenant de plus de 300 localités indique que leur diversité demeure faible du Trémadocien au Dapingien, avant de s'accroître très fortement du Darriwilien au Katien, puis de chuter au cours de l'Hirnantien. D'un point de vue taxonomique, ce signal reflète très largement la diversification des crinoïdes, qui représentent de 30 à 70% de la diversité totale et s'affirment au cours de l'Ordovicien comme l'un des éléments majeurs des écosystèmes marins. L'analyse des données en fonction de leur origine géographique suggère toutefois un très fort biais historique et/ou d'échantillonnage en faveur des faunes laurentiennes (Amérique du Nord, Ecosse; 20 à 50% des taxons), elles-mêmes très largement dominées par les crinoïdes. La composition des assemblages et l'évolution de leur diversité apparaissent très variables d'une région à l'autre (Avalonia, Baltica, marge ouest-gondwanienne) et surtout, très peu de données sont disponibles dans beaucoup d'autres (p. ex. Amérique du Sud, Asie centrale et du Sud Est, Australie, Chine, Sibérie). L'accroissement de l'effort d'échantillonnage dans certaines régions (p. ex. Maroc) a récemment permis de modifier profondément l'état de nos connaissances et invite donc à considérer avec davantage de prudence un signal de biodiversité à l'échelle du phylum encore très largement dominé par des données majoritairement en provenance d'un seul continent.

Mots-clés : Biais, Biodiversité, Echinodermes, Ordovicien, Paléogéographie



No Cambrian ‘explosion’ and no Great Ordovician Biodiversification ‘event’ : evidence for a single long-term radiation in the early Palaeozoic

Thomas Servais^{*}, Borja Cascales-Miñana¹ & David A.T.

Harper²¹CNRS, Université de Lille, UMR 8198 Evo-Eco-Paléo, F-59000 Lille, France

²Department of Earth Sciences, Durham University, Durham DH1 3LE, UK

The Cambrian ‘Explosion,’ placed by many authors between -540 and 520 million years ago (Ma), is considered to be an abrupt appearance in the fossil record of most animal phyla, with an almost sudden increase of complexity of morphologies of diverse metazoan groups. In a few recent papers, the Great Ordovician Biodiversification ‘Event’ (GOBE) has similarly been restricted to a single dramatic biodiversification ‘event’ in the Darriwilian Stage of the Middle Ordovician Series, between -470 and 455 Ma, although historically it is considered as a sum of radiation ‘events’ constituting all together a large and complex increase of taxonomic diversity of marine invertebrates covering the entire Ordovician. A review of biodiversity curves of marine organisms during the early Palaeozoic Era, including some based on the Paleobiology Database (PBDB) and the Geobiodiversity Database (GBDB), point toward a single, large-scale, long-term early Palaeozoic radiation of life that started already in the late Precambrian. An abrupt ‘explosion’ of diversity in the Cambrian or a significant ‘event’ in the Ordovician are not visible in the biodiversity studies. It becomes evident that the datasets remain incomplete, in particular for many geographical areas and for several fossil groups, that are not covered by the PBDB and GBDB, also because such areas remain so far poorly or entirely unstudied. It can be concluded that some recently published biodiversity curves have to be considered with care, as the truly global diversity estimates of marine organisms during the early Palaeozoic remain inaccessible.

Key-words : Cambrian ‘explosion’, Great Ordovician Biodiversification ‘Event’, radiation, biodiversity, Paleobiology Database, Geobiodiversity Database



Intracellular detection of nickel-porphyrins moieties in a 1-Gyroid multicellular alga allows to track early phototrophy

M.C. Sforina^{1*}, C.C. Loron¹, C.F. Demoulin¹, C. François², Y. Cornet¹, Y.J. Lara¹, D. Grolimund³, D. Ferreira Sanchez³, K. Medjoubi⁴, A. Somogyi⁴, A. Addad⁵, A. Fadel⁵, P. Compère⁶, D. Baudet⁷, J. J. Brocks⁸, E. J. Javaux¹

¹ Early Life Traces & Evolution-Astrobiology, UR Astrobiology, University of Liège, Belgium

² Commission for the Geological Map of the World, France

³ Paul Scherrer Institut, Swiss Light Source, Switzerland

⁴ Synchrotron Soleil, France

⁵ Unité Matériaux et Transformations, Université Lille 1, France

⁶ Functional and Evolutionary Morphology, Department of Biology, Ecology and Evolution, UR FOCUS, and Center for Applied Research and Education in Microscopy, University of Liège, Belgium

⁷ Geodynamics & Mineral Resources Service, Royal Museum for Central Africa, Belgium

⁸ Research School of Earth Sciences, The Australian National University, Australia

The end of the Proterozoic has seen the transition between ecosystems with bacterial primary producers to ecosystems where primary producers are photosynthetic eukaryotes. The emergence of photosynthetic eukaryotes is an important step in the evolution of Life, leading to the complexification of trophic networks, making possible the emergence of animals and the colonization of land. Although this transition is observed in the Neoproterozoic biomarker record, few phototrophic organisms are unambiguously recognized in the fossil record. Therefore, the timing of the onset of eukaryotic photosynthesis and its evolution in the different groups of eukaryotes are still poorly understood.

We report bound Ni-tetrapyrrole moieties preserved *in-situ* within cells of *Arctacellularia tetragonala*, a ~1 Gyr-old multicellular eukaryote from the Mbuji-Mayi Supergroup (DR Congo). Tetrapyrroles (e.g. hemes, chlorophylls) are pivotal constituents of the cell metabolism. Whereas tetrapyrroles commonly degrade in the early phases of burial and diagenesis, they may transform into geoporphyrins. Geoporphyrins are common in bulk solvent extracts of Phanerozoic sedimentary rocks but exceedingly rare in the Precambrian. Current approaches do not allow association of the detected porphyrins to individual fossils. They can also not be performed on overmature rocks because even relatively mild thermal alteration around 200°C is incompatible with the preservation of free biomarkers.

Combining morphological, chemical and ultrastructural analyses with synchrotron-based X-ray Fluorescence and X-ray Absorption Spectroscopy, we identified the tetrapyrrole moieties as chlorophyll derivatives, and *A. tetragonala* as one of the earliest algae, part of the Archaeplastidae supergroup.

This new methodology, applicable to billion-of-year old, overmature rocks, provides new constraints on the evolution of phototrophy during the Precambrian and the diversification of primary producers in early ecosystems.

Mots-Clés : Organic-walled microfossils, Tetrapyrrole moieties, Photosynthetic eukaryotes, Ecosystem evolution, Precambrian



T13.4 Gisements et Lagerstätten

français – inventaire de la

paléobiodiversité



Reconstruction du paléoenvironnement, du paléoclimat et du réseau trophique du *Lagerstätte* d'Angeac-Charente à travers les analyses paléontologique et multi-isotopique

Jean Goedert^{1,*}, Romain Amiot², Vincent Balter², Valérie Daux³, François Fourel⁴, Gomez Bernard ², Christophe Lécuyer², Jeremy Martin², Jean-François Tournepiche⁵, Arnaud Vinçon-Laugier², Romain Vullo⁶, Ronan Allain¹

¹Centre de Recherche en paléontologie (CR2P, UMR CNRS 7207), 75005 Paris, France

²Laboratoire de Géologie de Lyon : Terre, Planètes et Environnement (LGL-TPE, UMR CNRS 5276), F-69622 Villeurbanne, France

³Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement – Paris – (LSCE, UMR CNRS 8212)

⁴Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés (LEHNA, UMR CNRS 5023), F-69622 Villeurbanne, France

⁵Musée d'Angoulême, 16000 Angoulême, France

⁶Geosciences Rennes (UMR 6118), Université Rennes, CNRS, 35000 Rennes, France

Le site paléontologique d'Angeac-Charente a livré de nombreux restes fossiles témoins d'une flore et d'une faune très diversifiées de la base du Crétacé inférieur. Les premières études concernant la mise en place du gisement suggèrent que les couches fossilifères se sont déposées rapidement, lors d'un événement catastrophique de crue, préservant un instantané de cet écosystème ancien. Cette taphonomie particulière, associée à une préservation exceptionnelle, offre l'opportunité d'étudier comment s'intégraient cette flore et cette faune au sein de l'environnement de la région d'Angeac-Charente, il y a 140 millions d'années. En effet, la présence de plusieurs espèces de dinosaures herbivores, parmi lesquelles un sauropode gigantesque, mais également de dinosaures carnivores, d'un troupeau d'ornithomimosauriens, et de manière générale la grande diversité de vertébrés (dinosaures non-aviens, crocodiles, tortues, mammifères, oiseaux, amphibiens, lépidosauriens, ptérosaures, poissons osseux, requins) et leur abondance, interrogent sur le fonctionnement et la dynamique trophique d'un tel écosystème. Le projet PACé (Paléo-écosystème d'Angeac-Charente au Crétacé (140 millions d'années) tente de répondre à cette question en caractérisant, d'une part, le paléoclimat et le paléoenvironnement, et d'autre part, le réseau trophique afin de comprendre comment interagissaient les organismes de cette faune et de cette flore au sein d'un écosystème cohérent.

Pour ce faire, le projet s'appuie principalement sur les analyses de compositions isotopiques stables du carbone ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), de l'oxygène ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$), du soufre ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$), du calcium ($^{44}\text{Ca}/^{42}\text{Ca}$) et du strontium radiogénique ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) enregistrées dans les tissus osseux des vertébrés ainsi que dans les végétaux fossilisés du gisement d'Angeac-Charente.

Mots-Clés : Mésozoïque ; Bonebed ; Vertébrés ; Géochimie ; Isotopes stables



Découverte de nouveaux sites à préservation exceptionnelle dans l'Ordovicien du Massif armoricain et de la Montagne Noire (France) : une approche prédictive

Bertrand Lefebvre ^{1*}, Eric Monceret ², Bernard Pittet ¹, Farid Saleh ¹, Daniel Vizcaïno ³

¹ Univ Lyon, Univ Lyon 1, ENSL, CNRS, LGL-TPE, F-69622, Villeurbanne, France

² 18 rue des Pins, F-11570 Cazilhac, France

³ 7 rue Chardin, Maquens, F-11090 Carcassonne, France

Les gisements à préservation exceptionnelle (Lagerstätten) permettent d'appréhender avec une plus grande fidélité la diversité et la complexité des écosystèmes anciens. En effet, en plus des restes d'organismes pourvus de tests minéralisés (coquilles, carapaces), les seuls conservés dans la majorité des sites fossilifères, des tissus et/ou des organismes mous ou faiblement sclérotisés peuvent être également conservés dans les Lagerstätten. Ces gisements exceptionnels sont particulièrement abondants au cours du Cambrien inférieur à moyen, mais beaucoup plus rares par la suite. Au cours de ces vingt dernières années, la caractérisation des contraintes sédimentaires (faciès, ...) et des processus taphonomiques impliqués dans la préservation exceptionnelle des organismes dans le Lagerstätte des Fezouata (Ordovicien inférieur, Maroc) a permis d'élaborer un modèle prédictif favorisant la découverte de nouveaux gisements. Tout d'abord appliquée avec succès dans un périmètre plus vaste dans l'Anti-Atlas marocain, cette méthode a récemment permis de mettre en évidence deux Lagerstätten dans l'Ordovicien de France. Le premier, dans la Formation du Landeyran (Ordovicien inférieur) de la Montagne Noire (Hérault) a livré une faune abondante et diversifiée comprenant notamment des vers et des arthropodes peu sclérotisés. Le second, dans la Formation de Postolonnec (Ordovicien moyen) en presqu'île de Crozon (Finistère), a fourni des restes d'euryptérides pyritisés de grande taille.

Mots-clés : Lagerstätten, Massif armoricain, modèle prédictif, Montagne Noire, Ordovicien



Les thylacocéphales de La Voulte-sur-Rhône (Ardèche) : systématique, anatomie et paléobiologie

Thomas Laville ^{1*}, Marie-Béatrice Forel ¹, Sylvain Charbonnier ¹

¹ Centre de Recherche en Paléontologie – Paris – Muséum national d'Histoire naturelle, CNRS, Sorbonne Université – France

Les thylacocéphales (Euarthropoda, Thylacocephala) constituent un groupe d'euarthropodes d'affinités encore inconnues présent dans le registre fossile du Paléozoïque et du Mésozoïque. Bien qu'il reste des interrogations sur leur anatomie et leur tagmatisation, les thylacocéphales se caractérisent par certains traits anatomiques particuliers : un bouclier enveloppant la majorité du corps, des yeux composés proéminents, trois paires d'appendices ravisseurs, un tronc postérieur composé de 8 à 22 segments portant des appendices ainsi que 8 paires de branchies.

Très connu pour sa diversité en Euarthropodes, le Konservat-Lagerstätte jurassique de La Voulte-sur-Rhône (Callovien, Ardèche, France) avait jusqu'à maintenant livré les restes de quatre espèces de thylacocéphales : *Dollocaris ingens*, *Killianicaris lerichei*, *Paraostenia vouldensis* et *Clausocaris ribeti*. La révision du matériel historique ainsi que l'étude de matériel inédit a permis de mettre à jour une diversité taxonomique plus importante des thylacocéphales de ce Lagerstätte. L'étude du matériel original de *Clausocaris ribeti* a permis la réassignation de cette espèce à *Ostenocaris* ainsi que la description d'une nouvelle espèce, *Clausocaris* sp. nov. *Mayrocaris*, taxon originalement décrite dans le Lagerstätte de Solnhofen, est décrite pour la première fois à La Voulte. Une espèce à la morphologie inédite est aussi nouvellement décrite. Enfin, la présence d'un stade juvénile est attesté pour *Paraostenia vouldensis*.

Ce travail systématique a aussi permis de dévoiler de nombreux détails anatomiques sur les thylacocéphales : appendices céphaliques, segmentation, micro-ornementation, branchies... Ces informations concernant l'anatomie et l'organisation structurale des thylacocéphales permettent d'en apprendre plus sur leur paléobiologie ainsi que sur leurs affinités avec les pancrustacés.

Mots-Clés : Thylacocephala, Euarthropoda, Callovien, diversité, tagmatisation, appendices céphaliques



Les momies de l'Eocène des phosphorites du Quercy

Alfred Lemierre^{*1}, Ninon Robin², Salvador Bailon³, Annelise Folie⁴, Michel Laurin¹

1. CR2P- Centre de recherche en Paléontologie-CNRS/MNHN/Sorbonnes Université-France
2. School of Biological, Earth and Environmental Sciences-University College Cork-Irlande
3. Département Homme & Environnement, Muséum national d'Histoire naturelle, UMR 7194 HNHP et UMR 7209 AASPE, MNHN-CNRS Sorbonne Université, France
4. Service Scientifique du Patrimoine, Institut royal des Sciences naturelles de Belgique

Les phosphorites du Quercy forment un ensemble de gisements phosphatés ayant livré une importante faune, couvrant la transition Eocène-Oligocène. Au sein de ces gisements, les restes osseux d'amphibiens sont nombreux, bien que majoritairement isolés. En 1873, plusieurs spécimens d'amphibiens et de serpents en furent extraits, présentant une fossilisation assez unique en trois dimensions conservant la forme, les dimensions et l'aspect externe *in vivo* de ces petits vertébrés. Communément appelés « momies » par leur aspect externe préservé, ces derniers furent décrits au XIX^{ème} siècle, sans que leur anatomie interne ne soit en fait connue. Depuis 2012, les spécimens de ces amphibiens commencent à être tomographiés, révélant ainsi la présence interne de tissus mous et squelettiques quasiment complets et articulés. Nous décrivons ici la tomographie d'un deuxième spécimen d'anoure, identifié préalablement comme un « crapaud » (*Bufo servatus*). Elle révèle la même anatomie que l'autre momie déjà décrite, mais à un stade de développement plus avancé et avec une ceinture pectorale non déformée. Ces individus peuvent être attribués au taxon *Thaumastosaurus gezei*, et représentent des stades ontogénétiques différents. Avec ces données anatomiques, nous avons inclus *Thaumastosaurus* au sein d'une phylogénie, le plaçant proche des Pyxicephalidae, clade d'anoures africains. *Thaumastosaurus* représente à la fois la seule occurrence avérée de ce clade dans le registre fossile et hors d'Afrique. Sa présence en Europe permet par ailleurs de mettre en évidence un échange faunique entre l'Afrique et l'Europe durant l'Eocène. L'émergence de ce type d'herpétofaune africaine en Europe à ce moment serait liée au climat chaud dans la région. Ce taxon et la plus grande partie de cette herpétofaune africaine disparaissent cependant d'Europe lors du refroidissement de la limite Eocène-Oligocène (autour de 34 millions d'années) connu sous le nom de Grande Coupure.

Mot-clé : Anoure, Tomographie, *Thaumastosaurus*, Grande Coupure, Phylogénie, Quercy, Eocène

^{*}Intervenant



A new *Triodus* species (Xenacanthidae, Xenacanthiformes) from the basal Permian of France (Autun basin, Saône-et-Loire) and its palaeobiogeographical implications

Vincent Luccisano ^{*1,2}, Alan Pradel ³, Romain Amiot ¹, Georges Gand ^{4, 5},
J.-Sébastien Steyer ^{3, 5}, Gilles Cuny ²

¹ Laboratoire de Géologie de Lyon : Terre, Planète, Environnement (LGL-TPE) – ENSL – CNRS : UMR5276, Université Claude Bernard Lyon 1 – France

² Laboratoire d'Ecologie des Systèmes Naturels et Anthropisés (LEHNA) – CNRS : UMR5023, Université Claude Bernard Lyon 1 – France

³ Centre de Recherche en Paléontologie - Paris (CR2P) – Muséum National d'Histoire Naturelle – CNRS : UMR7207, Sorbonne Université – France

⁴ Biogéosciences – CNRS – EPHE : UMR6282, Université de Bourgogne Franche-Comté – France

⁵ Société d'Histoire Naturelle et des Amis du Muséum d'Autun – France

Xenacanthiformes forms an Order of elasmobranchs or stem-chondrichthyans known from the early Carboniferous to the upper Triassic. Their maximum diversity occurs around the Carboniferous-Permian boundary, notably in Europe.

In France, they are known since the 19th century in the Autun basin (Saône-et-Loire), particularly in the Muse oil-shale bed. Their systematics remains poorly understood: most of the specimens, consisting of isolated dorsal spines, are still identified as belonging to the genus “*Expleuracanthus*” Heyler, 1969 but it is potentially synonymous with *Triodus* and/or *Xenacanthus*. Their specific attribution remains therefore doubtful. Furthermore, French specimens attributed in the past to the genus *Triodus* Jordan, 1849 have no definite specific attribution, while this genus is known by at least ten species in the European Carboniferous- Permian basins.

We describe three new specimens of *Triodus* from the basal Permian of Autun, recently found during systematic excavation campaigns at Muse. These specimens allow the erection of a new species, *Triodus aeduum* sp. nov., and to discuss the validity of other species from Muse: “*Expleuracanthus*” *frossardi* (Gaudry, 1883) should be considered as a *nomen dubium* and other specimens attributed to *Triodus* are for the time being left in open nomenclature as *Triodus* sp. These results highlight the endemism of the *Triodus* species in each European Carboniferous-Permian basins where they are present, and raise the question of how they migrated from one to another.

Two hundred years after the first palaeontological excavation campaigns, the scientific interest of Muse is still relevant. This work illustrates the need to revise historical specimens, to carry out new excavation campaigns and to preserve this locality.

Mots-Clés : *Triodus*, Xenacanthiformes, Muse, Autun basin, systematics, palaeobiogeography



Exploration microtomographique d'arthropodes à préservation exceptionnelle du Lagerstätte de Montceau-les- Mines (Carbonifère)

Vincent Perrier ^{*1}, Maxime Seguin ¹, Maëva Perroux ¹, Jules Charrondière ¹,
Céline Salaviale ¹, Jérôme Adrien ², Dominique Chabard ³, Olivier Béthoux ⁴, Sylvain
Charbonnier ⁴

1- UMR CNRS 5276 LGLTPE - France

2- INSA de Lyon - France

3- Muséum d'histoire naturelle d'Autun – France 4- MNHN, France

Unique en France, le gisement à préservation exceptionnelle de Montceau-les-Mines est une fenêtre incroyable sur la vie au Carbonifère. Les organismes fossiles, emprisonnés dans des nodules sidéritiques y sont préservés en trois dimensions dans leurs moindres détails. Ces caractéristiques et la petite taille des fossiles en font des objets difficiles à étudier avec les techniques de préparation traditionnelles (ex. dégagement, moulages). Durant la dernière décennie et grâce au développement des techniques de tomographie à rayons X (ex. synchrotron, CT scan), les nodules de Montceau ont permis de mettre au jour la paléobiologie et l'histoire évolutive de plusieurs groupes fossiles (ex. vertébrés, arachnides). Nous présentons ici une étude préliminaire portant sur trois groupes d'arthropodes du Lagerstätte de Montceau-les-Mines (insectes, myriapodes et crustacés). La morphologie céphalique de plusieurs spécimens d'insectes scannés a permis de préciser leur position phylogénétique ainsi que de discuter leur régime alimentaire. Les scans de myriapodes ont révélé des détails anatomiques inédits, notamment au niveau de leur tube digestif. Enfin le spécimen de syncaride (Crustacea) numérisé est préservé avec ses œufs en position ventrale, et a permis de mieux comprendre la reproduction de ce groupe au Carbonifère.

De nombreux spécimens scannés n'ont pas été aussi informatifs. En effet, plusieurs des nodules scannés avaient été ouverts, et les fossiles préparés et moulés. L'ouverture des nodules (marteau, cycle gel/dégel) se fait sur le plan de fragilité du nodule (qui est souvent le fossile) et des écailles pouvant contenir des éléments cruciaux (ex. tête, appendices) peuvent être perdus à ce moment-là. Il en va de même pour la préparation et le moulage qui entraînent souvent une perte d'information anatomique importante. Le Lagerstätte ayant livré plus de 200 000 nodules, il semble très probable qu'une numérisation plus systématique des nodules non-ouverts permettra d'éviter ces problèmes et augmentera considérablement nos connaissances sur la paléobiologie et l'évolution de la faune et de la flore de Montceau.

Mots-Clés : Lagerstätte de Montceau-les-Mines, Carbonifère, arthropodes, paléobiologie, CT-Scan

*Intervenant



Microtomographic exploration of two arthropods from the Montceau-les-Mines Lagerstätte (Carboniferous)

Maxime Seguin¹, Mickaël Lheritier ¹, Olivier Béthoux², Vincent Perrier ^{*1}

1-UMR CNRS 5276 LGLTPE-France

2-MNHN, France

We report herein the microtomographic study of two arthropods (Insecta & Myriapoda) from the Montceau-les-Mines Lagerstätte (Carboniferous).

The detailed study of the wing of a fossil insect led to the description of a new species of the genus *Blattinopsis*. The use of the μ CT allowed the three-dimensional reconstruction of the specimen's mouthparts. The particularly long maxillary and labial palps, associated with “biting-chewing” type mandibles, come to test the phylogenetic status of Blattinopsidae as a stem-hemiptera on one hand, and question the diet and the ecology of this insect on the other hand. *Blattinopsis* sp. nov. A was probably palynovorous, and probably played a role in the pollination of plants in contemporary coal forests.

The μ CT study of four specimens of the millipede *Amynilyspes fatimae*, together with interpretation drawings, allowed the discovery of new head and sexual structures for this species. These new morphological features enabled the construction of a strong morphological character matrix in order to include this species in the phylogeny of the subclass Pentazonia. *Amynilyspes fatimae* is linked to the order Sphaerotheriida. The three-dimensional reconstruction of the specimens confirmed its terrestrial lifestyle and allowed discussions about its biology and ecology.

Mots-Clés: Montceau-les-Mines Lagerstätte, Carboniferous, Insecta, Myriapoda, CT-Scan



T13.5 Imagerie appliquée à la paléontologie



Publier autrement : Peer Community in Paleontology (PCI Paleo), Open Access, Open Data et Open Peer Review

Jérémy Anquetin ^{*1,2}, Guillaume Billet ³

¹ Jurassica Museum – Suisse

² Département des Géosciences, Université de Fribourg – Suisse

³ CR2P, UMR CNRS 7207, Muséum national d'Histoire naturelle, Sorbonne Université – France

Dans un monde idéal, les résultats de recherche seraient publiés rapidement dans des revues en accès libre (Open Access) afin que tout le monde puisse y avoir accès sans privilèges. Les données sur lesquelles ces résultats se fondent seraient aussi systématiquement et intégralement partagées avec l'ensemble des acteurs (Open Data) afin de faciliter leur réutilisation et faire avancer la science plus rapidement. Les articles scientifiques seraient évalués par des pairs compétents et bienveillants sur la base non pas de l'impact supposé mais de la qualité des recherches qu'ils relatent, et l'ensemble de ce processus serait transparent (Open Peer Review) afin de renforcer l'intégrité scientifique à tous les niveaux. Enfin, dans ce monde idéal, nous ne gaspillerions pas l'équivalent de plusieurs milliards d'euros de fonds publics chaque année afin de garantir les marges nettes de 30 à 40 % de quelques géants de l'édition académique.

D'un point de vue strictement technologique, ce monde idéal devrait être le notre depuis au moins 25 ans. Il est également surprenant que les scientifiques ne se soient pas révoltés plus tôt contre un système injuste et délétère auquel ils continuent pourtant de contribuer de manière significative (et souvent bénévole) en tant qu'auteurs, rapporteurs, et éditeurs. Heureusement, les choses sont en train de changer.

Les archives en ligne ouvertes telles que bioRxiv, paleorXiv, EarthArXiv, Zenodo ou HAL permettent déjà la publication immédiate et gratuite des articles scientifiques, questionnant ainsi la nécessité de maintenir un système de publication extrêmement coûteux et basé sur des journaux. Le processus d'évaluation par les pairs (peer review) de ces articles déposés en ligne peut très facilement être organisé en dehors des journaux traditionnels. Ainsi, il est possible d'entrevoir un nouveau système de publication où les articles sont d'abord publiés par les auteurs puis évalués de manière transparente par des communautés éditoriales. Le projet Peer Community In (PCI) est une initiative à but non lucratif issue de la communauté scientifique soutenant la constitution de vastes comités éditoriaux dans de multiples disciplines, incluant la biologie évolutive et la paléontologie. Peer Community in Paleontology (PCI Paleo) organise l'évaluation par les pairs des articles soumis et publie l'intégralité du processus éditorial de ceux qui sont acceptés (processus de peer review transparent). Une version finale et mise en forme des articles est alors déposée sur l'archive en ligne ouverte et un lien persistant existe entre l'article et le processus éditorial sur PCI Paleo. D'autre part, les critères éditoriaux de PCI Paleo imposent aux auteurs de partager l'ensemble de leurs données, codes et protocoles de manière pérenne. Ce système de publication opère sur des fonds très limités et est entièrement gratuit pour les auteurs et les lecteurs. En France, le CNRS, l'INRAE, l'IRD, l'Ifremer, l'INRAP ou encore de nombreuses universités et écoles doctorales soutiennent déjà ce projet.

Mots-Clés : Publication, Open Access, Open Data, Open Peer Review



Morphological variability of petrous bone in extant and extinct suids (Mammalia, Artiodactyla): taxonomic and phylogenetic implications of a new morphometric protocol

Karl Baltazart ^{1*}, Antoine Souron ¹, Bastien Mennecart ², Jean-Luc Guadelli ¹

¹ UMR 5199, PACEA (De la Préhistoire à l'Actuel : Culture, Environnement et Anthropologie), Bordeaux – France

² Naturhistorisches Museum Basel, Basel – Suisse

Suids are a suitable taxonomic group for understanding evolutionary mechanisms owing to their rich fossil record and their high morphological and ecological variability. Establishing a correct taxonomy is a crucial prerequisite for any paleontological study. The petrous bone displays a complex morphology and is an important source of taxonomic/phylogenetic characters, but their use is hindered by a poor understanding of intraspecific variability. We therefore developed an original protocol to quantify morphological variation of lateral and medial faces of the petrous bone by combining 3D traditional morphometrics (linear distances and areas) on surface models from CT scans and 2D geometric morphometrics (landmarks, semilandmarks) on photographs, drawings, and standardized views from 3D models. We applied this protocol to 74 petrous bones encompassing 12 taxa to disentangle intraspecific and interspecific components of variability of main morphological structures (bone outline, position and shape of main foramina). Using two reference groups of more than twenty specimens, the extant wild boar (*Sus scrofa*) and an extinct suid from Ahl al Oughlam, Morocco (previously attributed to *Kolpochoerus*), we identified characters varying intraspecifically (e.g., length of medial process of *protympanum*). We also compared the degree of intraspecific variation of these external characters to that of the internal structures (cochlea and semicircular canals) quantified in a previous study. We tested the influence of variable characters on taxonomic delineation and phylogenetic placement of species by conducting a phylogenetic analysis that combines discrete characters with quantitative characters from shape analyses of the petrous bone. One of the main results is the close phylogenetic affinity of the Ahl al Oughlam suid with extant warthogs (*Phacochoerus*) and the paraphyletic group of *Metridiochoerus*, confirming some previous studies carried out on skulls and teeth.

Mots-Clés : Suidae, taxonomy, biogeography, biochronology, *Kolpochoerus*, *Metridiochoerus*, *Phacochoerus*



Un os dans mon scan ? : Réexamen du néodiapside *Thadeosaurus colcanapi* Carroll, 1981 et tomographie d'empreintes de squelettes

Valentin Buffa ^{*1}, Nour-Eddine Jalil ^{1, 2}, Jocelyn Falconnet ¹, Peggy Vincent ¹

¹ Centre de Recherche en Paléontologie – Paris (UMR7207 – CR2P, MNHN-CNRS-SU) – France

² Faculté des Sciences de Semlalia, Université Cadi Ayyad, Marrakech – Maroc

La faune de la Formation de la Sakamena inférieure du Lopingien de Madagascar est représentée par de nombreux restes de reptiles néodiapsides. Elle se distingue ainsi des faunes à tétrapodes contemporaines, dominées par les synapsides, car on y dénombre au moins six genres de reptiles : un parareptile procolophonoidé et cinq néodiapsides dont les relations phylogénétiques restent débattues. Cette faune unique offre ainsi une fenêtre sur une période clé de la diversification des reptiles, juste avant la limite Permien-Trias.

Un de ces néodiapsides, *Thadeosaurus colcanapi* Carroll, 1981, reste énigmatique. La totalité des spécimens qui y sont référés sont préservés sous forme de nodules portant l'empreinte du squelette en connexion anatomique. L'os est absent du plan de fracturation naturel de ces nodules et seule l'empreinte très fidèle de la surface des os est préservée. Néanmoins, l'examen par CT-scan de l'holotype de *T. colcanapi* a révélé la présence d'os à l'intérieur du nodule, en dehors du plan de fracturation. Le scan de ce spécimen a ainsi permis de décrire des détails anatomiques inédits et d'accéder aisément à la silhouette de l'animal, l'absence d'os permettant en effet une segmentation extrêmement rapide. De nombreux autres spécimens sont susceptibles de livrer des résultats similaires, soulignant l'intérêt du CT-scan pour ce type de matériel.

L'étude directe des spécimens référés et des données tomographiques a également permis de discuter l'anatomie ostéologique et myologique de *T. colcanapi* avec un très bon degré de précision. Ces informations ont permis de préciser ses relations de parenté au sein des reptiles du Permien-Trias, et apportent des éléments de réponse sur son mode de vie – terrestre ou semi-aquatique – encore discuté. Enfin, ces résultats permettent de discuter des relations de parenté des 'Younginiformes', un assemblage incluant une grande partie des reptiles néodiapsides connus dans le Lopingien, mais dont la monophylie reste débattue.

Mots-Clés : Reptile, *Thadeosaurus*, Empreinte, CT-scan, Lopingien, Madagascar.

*Intervenant



Assessing the flight performances of the first gliding reptiles

Valentin Buffa ^{*1}, Thomas van de Kamp ^{2,3}, Marcus Zuber ^{2,3}, Eberhard Frey ⁴,
Jean-Sébastien Steyer ¹, Michel Laurin ¹

¹ Centre de Recherche en Paléontologie – Paris (UMR7207 – CR2P, MNHN-CNRS-SU) – France

² Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Photon Science and Synchrotron Radiation (IPS),
Hermann- von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Germany

³ Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Laboratory for Applications of Synchrotron Radiation (LAS),
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe, Germany.

⁴ Abteilung Geowissenschaften, Staatliches Museum für Naturkunde Karlsruhe – Germany

The Weigeltisauridae, known from the Lopingian of Madagascar, Germany, England and Russia, are the first known gliding reptiles – and amniotes. While their aerial lifestyle is commonly accepted, very little is known about their ecology and flight performance.

The detailed examination of specimens from the Permian of Madagascar and Germany allows for the redescription of the cranial and postcranial anatomy of these enigmatic animals. The almost complete Ellrich specimen, housed in the Karlsruhe Museum of Natural History (Germany), was studied using Computed Laminography (CL). This technique, developed for the study of flat material, is uniquely suited to examine highly compressed specimens preserved on slabs and allows for the observation and description of novel anatomical features. These observations highlight significant osteological differences between weigeltisaurid taxa, most interestingly in the trunk and patagium regions. We observe different patterns in the bones supporting the patagium. This might suggest different flight adaptations. Furthermore, the CL data has revealed the position, organization and anchoring of the patagium, which we also describe in detail for the first time.

These anatomical data will be incorporated into a new 3D skeletal and *in vivo* (i.e. with muscles and skin) reconstructions of these reptiles. These 3D models will then be used in wind tunnel experiments to quantify the flight performance of weigeltisaurids, and enhance our understanding of the first flight adaptations in amniotes.

Mots-Clés : Gliding reptiles, Weigeltisauridae, Wing, Flight, Computed laminography, Wind tunnel.

*Intervenant



Unravelling diagenetic features in Cretaceous brachiopod shells using a SEM and AFM methodology - comparisons with recent shells

Danièle Gaspard*

Centre de Recherche en Paléontologie – Paris (CR2P), UMR 7207, CNRS-MNHN-Sorbonne Université, Muséum national d'Histoire naturelle, Département Origines & Evolution - France

Recent representatives of one of the three subphyla of the phylum Brachiopoda (the rhynchonelliformea) were observed prior to comparisons with those of Cretaceous age. After recognition of their morphology, the details of the hierarchical organization of these low-Mg calcite bivalved shells, considered as biomaterials, are analysed through the process of biomineralization. Modifications intervene in the course of fossilisation allowing pointing outlight or heavy modifications in these biomaterials.

Several methods were applied to approach these recent brachiopod shells: using the scanning electron microscopy (SEM) and the atomic force microscopy (AFM). These complementary approaches allow observations at the micro and nano levels because it is essential to see what is the original state of organization of the shell and what is changed after death and during burial in the sediment.

Using both SEM and AFM observations on mirror sections we highlighted diagenetic alterations both in two-layered shells (with a primary and a fibrous secondary layers) and in three-layered shells (with an additional tertiary prismatic/columnar layer) from the recent period and during cretaceous stages.

While the inorganic phase of the shell is in intimate relation with the organic phase, the consequence could be a disorganization of the shell cohesion if the organic phase is destroyed, or a strengthening through recrystallization. SEM observations allow observe fusion of fibres after disappearance of the organic matrix around them, but AFM observations allow reaching the behaviour of the nanoparticles that compose the fibres and prisms when the intracrystalline matrix disappears.

What is responsible of these alterations throughout the fossilization process? The answer lies in the more or less rapid burial in the sediment, but also and above all in the presence of microboring organisms (algae, fungi) as well as in the bacterial activity within the shells (the organic matrices being a convenient food supply).

Mots-Clés : Brachiopod shells, Cretaceous, Recent, Diagenetic modifications, AFM, SEM



Reconstruire la faune de vertébrés du Lagerstätte d'Angeac-Charente : une approche 3D

Florent Goussard ^{*1}, Ronan Allain ¹, Renaud Bourgeois ²

¹ CR2P – Centre de recherche en Paléontologie - Paris – France

² EPHE, France

Le gisement du Crétacé inférieur d'Angeac-Charente est sans conteste l'un des plus beaux Lagerstätte d'Europe, par la diversité taxonomique végétale et animale et la quantité de restes fossiles qu'il livre depuis 2010 : les os, dents, coquilles, empreintes, feuilles, troncs et coprolithes se comptent ainsi par dizaines de milliers.

Sur la quarantaine de taxons de vertébrés recensés, l'ornithomimosaure d'Angeac représente à lui seul la moitié des macrorestes récoltés avec plus de 4000 restes correspondant à un troupeau estimé à une cinquantaine d'individus. Mais en l'absence de squelette articulé, cette profusion exceptionnelle de données ne livre toutefois qu'une image parcellaire de ce taxon emblématique du gisement.

Avec autant d'éléments disponibles, il devient néanmoins virtuellement possible d'en assembler un squelette composite complet en 3D. La qualité de préservation inégale (incomplétude, fracturation, déformation, etc.), les différences d'âge et de taille entre les individus et l'absence totale de certains os du crâne sont en effet autant d'obstacles que l'imagerie 3D permet aujourd'hui de contourner.

Plus de 250 restes plus ou moins fragmentaires ont ainsi été numérisés, puis retraités individuellement (réassemblage des fragments fracturés, rétrodéformation, fusion de fragments divers en « os composites » uniques, symétrisation) avant d'être remis à l'échelle à partir de l'étude des proportions du squelette chez d'autres ornithomimosaures plus complets. Le résultat final de ce travail est un squelette composé de plus de 160 os individuels, dont l'impression 3D et le soclage permet aujourd'hui sa présentation au public en position de vie.

Cette reconstitution a ouvert la voie pour d'autres taxons du gisement, dont une tortue *Pleurosternon* et un crocodile *Goniopholis* pour lesquels l'avancée du travail en cours est également présentée.

Mots-Clés : reconstruction ; 3D ; Lagerstätte ; composite ; ornithomimosaure



Imageries 2D appliquées à la paléontologie : une source de nouvelles informations anatomiques et taphonomiques

Pierre Gueriau ^{*1}

¹ Institut des Sciences de la Terre - Université de Lausanne, Géopolis, CH-1015 Lausanne - Suisse

L'imagerie 3D est aujourd'hui très couramment utilisée en paléontologie. Le développement de la microtomographie à rayons X, qui permet d'accéder à l'anatomie interne de fossiles, a clairement été à l'origine d'une véritable révolution, fournissant des informations inédites et cruciales sur l'origine et l'évolution de nombreux organismes. Le rendu 3D de surfaces externes par photogrammétrie est également une technique prisée, et pas seulement des chercheurs mais aussi, avec l'avènement du numérique et de l'impression 3D, d'un point de vue muséologique et pédagogique ainsi que pour la numérisation des collections. En parallèle, ces dernières années ont également vu le développement d'une série de méthodes d'imagerie 2D multi-échelles : cartographies d'éléments chimiques, de phases minérales ou encore de groupes fonctionnels et groupements moléculaires. Ces approches, passées en revue dans cette contribution, reposent pour la plupart sur différentes modalités de rayons X synchrotron (fluorescence, diffraction, absorption et diffusion). Appliquées à des fossiles plats ou des coupes de fossiles préservés en 3D elles offrent de nouveaux contrastes pouvant révéler des détails anatomiques invisibles en lumière naturelle, mais surtout d'importantes informations paléobiologiques, paléoenvironnementales et taphonomiques. Un accent particulier sera donné aux questions d'échelles et de résolution qui ont été, et restent, les moteurs principaux des développements les plus récents.

Mots-Clés : Spectro-imagerie, rayons X, synchrotron, fossiles plats, fossilisation, préservation exceptionnelle



Un nouveau regard sur l'anatomie du thylacocéphale *Concavicularis woodfordi* (Cooper, 1932): apport de la microtomographie à rayons X

Thomas Laville ^{*1}, Marie-Béatrice Forel ¹, Thomas A. Hegna ³, Charbonnier Sylvain ¹

¹ Centre de Recherche en Paléontologie – Paris – Muséum national d'Histoire naturelle, CNRS, Sorbonne Université – France

² Department of Geology and Environmental Science, State University of New York at Fredonia, U.S.A.

Connus de l'Ordovicien au Crétacé, les thylacocéphales sont des euarthropodes fossiles énigmatiques, souvent rapprochés des pancrustacés. Malgré les interrogations persistantes sur leur anatomie, les thylacocéphales se définissent par des caractères anatomiques particuliers : un bouclier enveloppant la majorité du corps, des yeux composés proéminents, trois paires d'appendices ravisseurs, un tronc postérieur composé de 8 à 22 segments portant des appendices ainsi que 8 paires de branchies. Afin d'en apprendre plus sur leur anatomie, il est nécessaire de mettre en œuvre de nouvelles approches.

La formation *Woodford Shale* (Famménien supérieur, Dévonien supérieur, Oklahoma, U.S.A) a fourni des restes d'euarthropodes, dont ceux de deux espèces de thylacocéphales : *Concavicularis elytroides* (Meek, 1968) et *Concavicularis woodfordi* (Cooper, 1932). Nous avons réétudié cette dernière espèce à l'aide de la microtomographie à rayons X. Les données obtenues ont permis de mettre en évidence des détails anatomiques, notamment de la structure du bouclier, des branchies et des appendices postérieurs du tronc. Ces éléments ont permis d'exposer les similitudes entre *Concavicularis woodfordi* et d'autres espèces paléozoïques, notamment *Concavicularis submarinus* Jobbins, Haug & Klug, 2020 (Famménien, Dévonien supérieur, Maroc), une des rares espèces de thylacocéphales étudiées à l'aide de la microtomographie à rayons X.

La description de l'anatomie interne de *Concavicularis woodfordi* apporte ainsi des informations importantes pour résoudre les affinités des thylacocéphales au sein des euarthropodes mais aussi les relations au sein des thylacocéphales.

Mots-Clés : Thylacocephala, Dévonien supérieur, paléontologie virtuelle, anatomie interne, parties molles



*Intervenant



Tomographie à rayons X et microfossiles : Application aux foraminifères et aux ostracodes

Nathalie Poulet-Crovisier ^{*1}, Marie-Béatrice Forel ¹

¹ CR2P – Centre de recherche en Paléontologie - Paris – France

Les techniques d'imagerie utilisées par la cellule d'imagerie 3D du CR2P (Centre de recherche en Paléontologie - Paris) se nourrissent des données provenant de la tomographie à rayons X (CTscan et synchrotron), de scanners surfaciques ou de photogrammétrie, sur un large spectre de tailles de spécimens (de pluri-centimétriques à millimétriques).

A partir du traitement des données de la microtomographie à rayons X plusieurs études ont été menées sur les foraminifères afin de quantifier, entre autres, le volume des loges et la porosité des tests étudiés. Plus récemment, une analyse exploratoire utilisant la même approche a pu être menée sur des ostracodes de la famille des Bairdiidae datant du Permien jusqu'à l'Actuel à partir de jeux de données obtenus au CT-scan du Slovenian National Building and Civil Engineering Institute de Ljubljana.

La classification des Bairdiidae actuels repose essentiellement sur leurs parties molles, appendices et caractères de la face interne des valves. Ces caractères étant rarement observés dans le registre fossile, chaque nouvelle observation est donc précieuse pour nous éclairer sur leur taxinomie. La précision des images obtenues et les traitements appliqués permettent ainsi d'accéder à des détails extrêmement fins et autrement inaccessibles sans dommage pour les spécimens. Des caractéristiques sur l'ornementation, la charnière et la porosité des valves ont ainsi pu être mises à jour de même que certaines observations anatomiques sur la face interne des valves.

Ces exemples mettent en évidence les éventuelles difficultés rencontrées lors de l'acquisition et du traitement de ce type de données sur les microfossiles.

Mots-Clés : Microtomographie à rayons X, foraminifères, ostracodes



Étude du premier endocrâne de l'iconique *Sylviornis neocaledoniae* (Aves, Galliformes) et ses implications écologiques

Sékolène Riamon ^{*1}, Jean-Sébastien Steyer ², Pauline Guenser, Jeanne Rolland-Guillard ¹, Céline Salaviale ¹, Mathilde Bouchet³, Antoine Louchart ¹

¹ Laboratoire de Géologie de Lyon : Terre, Planètes, Environnement (LGL-TPE), Université de Lyon - CNRS : UMR5276, Université Claude Bernard Lyon1 – France

² Centre de Recherche en Paléontologie de Paris – CNRS : UMR7207, Muséum National d'Histoire Naturelle – France

³ Institut de Génétique Fonctionnelle de Lyon, Université de Lyon - CNRS : UMR 5242, École Normale Supérieure de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1 - France

Sylviornis neocaledoniae (Sylviornithidae, Galliformes) est l'oiseau le plus énigmatique de la faune néo-calédonienne. Il disparaît, il y a moins de 2 000 ans, peu de temps après l'arrivée des premiers hommes en Nouvelle-Calédonie. Produit de l'évolution insulaire, en l'absence de prédateurs continentaux, *S. neocaledoniae* était remarquable de par sa taille (30kg), son incapacité au vol ou encore son articulation rostro-crâniale. Peu étudié, de nombreux aspects de sa biologie, son écologie et son comportement sont encore inconnus. Nous avons utilisé la tomодensitométrie à rayons X à haute résolution pour étudier la morphologie endocrânienne de cet oiseau. Chez les oiseaux, l'endocrâne est fortement corrélé au volume et à la morphologie des tissus cérébraux sous-jacents. Les études paléo-neurologiques peuvent ainsi fournir des indices écologiques et comportementaux des oiseaux disparus. L'endocrâne de *S. neocaledoniae* a été reconstruit puis comparé aux endocrânes appartenant à différents ordres d'oiseaux actuels et disparus. Au sein des Galliformes, une comparaison davantage poussée avec des représentants actuels de toutes les familles a été réalisée. Les caractéristiques endocrâniennes de *S. neocaledoniae* sont ici interprétées et discutées en termes d'évolution et de potentielles adaptations écologiques.

Mots-Clés : Tomодensitométrie, Paléo-neurologie, Morphologie comparative, Nouvelle-Calédonie, Galliformes, Extinction anthropique



T13.6 Biodiversité des écosystèmes continentaux et marins au Mésozoïque



La radiation des premières tortues marines (Thalassochelydia) dans le Jurassique supérieur européen

Jérémy Anquetin ^{*1,2}, Christian Püntener ³

¹ Jurassica Museum – Suisse

² Département des Géosciences, Université de Fribourg – Suisse

³ Naturmuseum Solothurn – Suisse

Les Thalassochelydia constituent le premier groupe de tortues marines de l'histoire. Ces formes connues principalement en Europe au Jurassique supérieur atteignent à cette époque une diversité taxinomique impressionnante. Au cours des dernières années, nous avons contribué, avec d'autres auteurs, à la réévaluation de la radiation des Thalassochelydia grâce à la révision systématique des collections historiques et la description de nouveaux spécimens, notamment dans le nord-ouest de la Suisse. Nous résumons ici l'avancée de ces travaux.

Les tortues marines côtières du Jurassique supérieur rassemblent une multitude de formes traditionnellement attribuées aux familles des Plesiochelyidae, Thalassemydidae et Eurysternidae. La monophylie respective de ces familles n'est pas encore clairement établie, mais il semble bien que l'ensemble des espèces concernées forment un clade auquel le nom de Thalassochelydia a été attribué récemment. Selon la plupart des hypothèses phylogénétiques, les Thalassochelydia n'ont pas de liens de parenté avec les tortues marines modernes, qui elles se diversifient à partir du Crétacé inférieur.

La systématique des Thalassochelydia, héritée des travaux du 19^e siècle, est longtemps restée confuse malgré, ou peut-être à cause, de la quantité de matériel disponible en provenance de sites renommés tels que Solnhofen en Allemagne, Soleure en Suisse, ou encore Cerin et Canjuers en France. Sur 68 taxons nommés dans la littérature jusqu'en 2017, 27 se sont révélés valides, la majorité datés du Kimméridgien ou du Tithonien.

En parallèle de ces révisions, nous avons décrit récemment dans une série d'articles un nouvel assemblage provenant du Kimméridgien de la région de Porrentruy, Suisse. Cet assemblage témoigne à la fois de la coexistence d'un grand nombre d'espèces de Thalassochelydia dans un même environnement et de la grande diversité de ce groupe. En effet, une dizaine d'espèces sont présentes dans cette localité et la moitié d'entre elles sont nouvelles pour la science.

Les travaux sur ce groupe se poursuivent et s'étendent désormais au Crétacé inférieur où leur présence a été démontrée récemment avec, pour la première fois, une espèce associée à des dépôts d'eau douce.

Mots-Clés : Plesiochelyidae, Thalassemydidae, Eurysternidae, Thalassochelydia, Jurassique supérieur



Géologie et paléontologie de l'ambre du Congo, le premier ambre crétacé fossilifère d'Afrique

Valentine Bouju ^{*1}, Vincent Perrichot ¹, Vincent Delhay-Prat ², Johanne Esnault ¹,
Laurent Jeanneau ¹, Youssef A. Nohra ¹

¹ Géosciences Rennes, CNRS, UMR 6118, Univ Rennes – France

² TOTAL, Centre Scientifique et Technique Jean Feger, Pau – France

L'ambre est une formidable source de données pour la reconstitution des écosystèmes terrestres anciens, mais sa distribution géographique et stratigraphique demeure lacunaire. En Afrique, l'ambre est relativement rare et le plus souvent dépourvu d'inclusions organiques fossiles. Le premier ambre crétacé fossilifère africain, découvert récemment dans la chaîne du Mayombe, en République du Congo, est présenté ici.

L'ambre s'est accumulé avec des débris végétaux dans le terme argilo-dolomitique qui constitue la partie supérieure de la Formation Chéla (un équivalent du membre Vembo de la Formation Gamba du Gabon) et daté de l'Aptien moyen par l'étude de son contenu micropaléontologique (palynomorphes et ostracodes). La caractérisation de l'ambre par thermochimie couplée à la spectrométrie de masse (THM-GC-MS) indique une résine de classe Ib typique des gymnospermes, et plus particulièrement des familles de conifères Araucariaceae, Cupressaceae, Podocarpaceae, et Cheirolepidiaceae. Les bois fossilisés trouvés avec l'ambre sont attribuables aux genres *Agathoxylon* et *Brachyoxylon*, tandis que les genres *Araucariacites* et *Classopollis* (ce dernier abondant) sont présents parmi les palynomorphes, suggérant une Araucariaceae ou une Cheirolepidiaceae comme plante source de la résine.

L'ambre du Congo se présente majoritairement sous la forme de galets de couleur rouge sombre, peu translucides. La prospection et l'étude d'inclusions fossiles, réalisées au moyen de la microscopie standard et de l'imagerie synchrotron, ont permis la découverte d'une faune diversifiée d'arachnides (Acari: Gustavioidea, Anystoidea; Araneae), d'insectes (Hyménoptères: Evaniidae, Platygastroidea; Hémiptères: Aleyrodidae; Psocoptères: Trogiomorpha; Diptères: Chironomidae), ainsi que de nombreux débris végétaux, fongiques, et bactériens. Certaines de ces inclusions et la forme en galet des morceaux d'ambre suggèrent un piégeage dans la résine préférentiellement au niveau du sol.

Les études sédimentologiques et taphonomiques indiquent un dépôt de l'ambre et des débris végétaux en milieu lacustre, dans un bassin interne connecté épisodiquement à l'océan, et sous un paléoclimat chaud avec une saisonnalité marquée.

Mots-Clés : ambre, arthropodes, Gymnospermes, Aptien, Congo



Dicynodontes du Maroc et du Laos : anatomie, phylogénie et implications sur l'évolution des dicynodontes et sur la paléobiogéographie des blocs Sud-Est asiatiques

Olivier, Chloé¹, Nour-Eddine Jalil^{1, 2*}, Sylvie Bourquin³

¹Centre de Recherche en Paléontologie, Paris (CR2P) – CNRS - MNHN – Sorbonne Université - France

²Muséum d'histoire naturelle, Département de Géologie – FSSM, Université Cadi Ayyad - Maroc

³Univ Rennes, CNRS, Écosystèmes Rennes - UMR 6118 - France

Les dicynodontes forment un groupe emblématique de thérapsiens « reptiles mammaliens », du Permo-Trias (P-Tr). Ils représentent une composante majeure des faunes continentales du P-Tr et les plantivores dominants de leurs écosystèmes. Leur distribution géographique cosmopolite et leur grande diversité taxonomique leur confèrent un rôle essentiel pour comprendre les tendances macroévolutives et évaluer l'impact de la crise biotique sur les écosystèmes terrestres au P-Tr. Des restes de dicynodontes du Permien et du Trias du Laos et du Maroc affinent nos connaissances sur la phylogénie des dicynodontes et la paléobiogéographie du Sud-Est asiatique autour de la limite P-Tr.

Trois espèces de dicynodontes sont décrites dans le Trias (Carnien) du Maroc (Bassin d'Argana, base du Membre Irohalene) : *Moghreberia nmachouensis*, *Azarifeneria barrati* et

A. robustus. La validité taxonomique de ces espèces, décrites uniquement par des restes crâniens, a toujours été débattue. La révision des restes attribués à *Azarifeneria* n'a pas mis en évidence de caractères propres distinguant les deux espèces *Azarifeneria barrati* et *A. robustus* des autres dicynodontes du Trias, ni de *Moghreberia nmachouensis*. Ces deux espèces devraient donc être considérées nomina dubia. Contrairement aux études précédentes qui alliaient *Moghreberia* et la forme nord-américaine *Placerias*, notre analyse phylogénétique a conclu à une étroite parenté entre l'espèce marocaine et *Lisowicia* du Trias supérieur (Norien-Rhétien) de Pologne.

Les dicynodontes du Laos datés par la méthode du zircon U-Pb, donnent un aperçu des faunes terrestres de l'Asie du Sud-Est au tournant Paléozoïque-Mésozoïque. Les affinités phylogénétiques de ces nouveaux dicynodontes laotiens mettent en évidence la survie d'une lignée supplémentaire à la crise P-Tr. Leur présence au Laos, très probablement au début du Trias, impliquerait une connexion entre le bloc d'Indochine et le bloc de Chine méridionale au moins dès le Trias inférieur voire le Permien supérieur.

Mots-Clés : Dicynodontia, Maroc, Laos, Permien, Trias, Anatomie, Phylogénie, Evolution, Paléobiogéographie



Diversité & distribution des thylacocéphales du Trias inférieur

Thomas Laville ^{1*}, Christopher Smith ², Marie-Béatrice Forel ¹, Arnaud Brayard ²,
Sylvain Charbonnier ¹

¹ Centre de Recherche en Paléontologie – Paris (UMR 7207) – Muséum national d'Histoire naturelle, CNRS, Sorbonne Université – France

² Biogéosciences (UMR 6282) – Université Bourgogne Franche-Comté, CNRS, EPHE – France

Les thylacocéphales sont un groupe énigmatique d'euarthropodes qui se distinguent par leur bouclier enveloppant la majorité du corps, de larges yeux composés, trois larges paires d'appendices ravisseurs et un tronc composé de 8 à 22 segments portant des appendices. Connus de l'Ordovicien au Crétacé, c'est durant le Trias que la diversité taxonomique des thylacocéphales semble la plus importante avec 18 espèces décrites provenant de 19 localités différentes. Parmi ces 18 espèces, 10 ont été décrites de gisements datant du Trias inférieur (Chine, Japon, Madagascar, Etats-Unis).

Il semble néanmoins que cette diversité ait été sur-évaluée. L'étude du matériel original du Trias inférieur de Madagascar, de Chine, du Japon et des Etats-Unis (Paris Biota) ainsi que l'étude de nouveaux spécimens provenant du Paris Biota nous a conduit à revoir la systématique des thylacocéphales du Trias inférieur. Aux Etats-Unis, des spécimens avec une morphologie inédite sont décrits et *Parisicaris triassica* est réassigné à *Ankitokazocaris triassica* nov. comb du fait de l'absence d'encoche ventrale. Ce travail descriptif a aussi mené à la révision de plusieurs taxons de Chine et du Japon : *Ankitokazocaris tatensis* est mis en synonymie d'*Ankitokazocaris chaohuensis*, *Concavicularis parva* et *Kitakamicaris utasuensis* sont réassignés respectivement à *Ankitokazocaris parva* nov. comb. et à *Ankitokazocaris utatsuensis* nov. comb. sur la base de la morphologie générale de la carapace.

A la lumière de cette étude, il apparaît que la diversité taxonomique des thylacocéphales a été surestimée au Trias inférieur. Bien que le Trias soit la période la plus riche en gisements recelant des thylacocéphales, elle pourrait ne pas être celle avec la plus grande diversité taxonomique.

Mots-Clés : Thylacocephala, Euarthropoda, Paris Biota, Madagascar, Japon, Chine, systématique



Paris Biota: At the dawn of modern marine faunas?

Christopher Smith^{*1}, Emmanuel Fara¹, Arnaud Brayard¹ and the ParisBiota team

¹Biogéosciences – CNRS : UMR 6282, Université Bourgogne Franche-Comté- France.

The Permian/Triassic boundary (PTB; ~252 Ma) crisis was undoubtedly the most severe mass extinction of the Phanerozoic, killing over 90 % of marine species, and about 70% of continental vertebrates. This event also marked one of the major faunal shifts of the Phanerozoic with the transition between Sepkoski's Paleozoic and Modern evolutionary faunas. This transition was not instantaneous but took place at least throughout the Early Triassic, if not longer. At the time, the environment was very unstable leading to a succession of smaller scale biotic crises. These are often assumed to have postponed the post-PTB biotic recovery. The most severe of these biotic crises occurred around the Smithian/Spathian boundary (SSB). Unfortunately, although this environmentally-unstable short interval is rather well characterized by geochemical proxies, its fossil record is particularly scarce, leaving a significant gap in the current knowledge on the post-PTB biotic recovery. In such context, a highly unexpected, diversified and complex fossil assemblage dated from immediately after the SSB was recently uncovered in the western USA basin. Named the Paris Biota, its components open a stunning new window on Early Triassic ecosystems and on the rise of modern evolutionary faunas. Comprised of Lazarus and new taxa for the Early Triassic, this assemblage reflects a diversified and complex community in the immediate aftermath of the SSB crisis. It also constitutes a fully recovered ecosystem contrasting with other known Early Triassic faunas. Thus, in the frame of the post-PTB crisis and the immediate aftermath of the SSB, the considerable new information yielded by the Paris Biota will stimulate the already lively debate regarding the modalities and tempo of the PTB biotic recovery.

Key words: Early Triassic, Smithian/Spathian boundary, biotic recovery, marine ecosystems, western USA basin.



The fossil locality of Persac (Vienne, France): a unique window on a 100 million years old continental ecosystem

Xavier Valentin* ¹⁻⁹, Romain Amiot ², Anaïs Boura ³, Lionel Cavin ⁴, Carles Martín-Closas ⁵, Jean-François Gobé ⁹, Pascal Godefroit ⁶, Bernard Gomez ², Véronique Daviero-Gomez ², Jeremy E Martin ², Olga Otero ¹, Xabier Pereda-Suberbiola ⁷, Philippe Sorrel ², Christophe Texier ⁹, Romain Vullo ⁸ and Géraldine Garcia¹⁻¹⁰

¹ PALEVOPRIM - UMR CNRS 7262, Université de Poitiers – France

² LGL - UMR CNRS 5276, ENSL, Université de Lyon 1 - France

³ CR2P- UMR CNRS 7207 - MNHN, Université de la Sorbonne - France

⁴ Département de Géologie et Paléontologie, Muséum d'Histoire naturelle de la ville de Genève - Suisse

⁵ Departamento de Ciencias de la Tierra y del Océano, Universidad de Barcelona - Spain

⁶ Directorate 'Earth and History of Life', Royal Belgian Institute of Natural Sciences - Belgium

⁷ Departamento de Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco - Spain

⁸ Géosciences Rennes- UMR CNRS 6118, Université de Rennes 1 - France

⁹ PALAIOS, Association de recherche – France

¹⁰ CVCU, Centre de Valorisation des Collections Universitaires, Université de Poitiers – France

Abundant and diverse fossil assemblages were recently collected from Albian-Cenomanian (mid-Cretaceous) cross-stratified beds filling a Bajocian (Middle Jurassic) paleokarst exposed near the town of Persac, Vienne, western France. They include well-preserved fossils of bivalves, gastropods, charophytes, plant leaves and wood, bony fishes, lissamphibians, turtles, lizards, crocodyliforms, dinosaurs, pterosaurs, and mammals. During the last three years 12 m³ of sediments were screen-washed. More than 200,000 micro-remains have already been sorted out, ranging from a few mm to a 10 cm in size. The fauna consists of both freshwater and terrestrial organisms. It offers, thus, an inestimable milestone of scientific and patrimonial value for the mid-Cretaceous European continental ecosystems.

Mots-Clés : Albian - Cenomanian, continental deposit, freshwater, plants, vertebrates, palaeoenvironment



T14.1 Stratigraphie intégrée – Temps géologique – Calibration astronomique



Cenomanian-Turonian boundary diachroneity unraveled by highly resolved carbon-isotope cyclostratigraphy from the Paris Basin Chalk

Slah Boulila ^{*1, 2}, Guillaume Charbonnier ^{1,3}, Jorge E. Spangenberg ⁴, Silvia Gardin ⁵, Bruno Galbrun ², Justine Briard ¹, Laurence Le Callonnec ³

¹ Sorbonne Université, Institut des Sciences de la Terre Paris, ISTeP UMR 7193, F-75005 Paris, France.

² ASD, IMCCE-CNRS UMR 8028, Observatoire de Paris, PSL Research University, Sorbonne Université, 77avenue Denfert-Rochereau, 75014 Paris, France.

³ Institute of Earth Sciences, University of Lausanne, Géopolis, CH-1015 Lausanne, Switzerland

⁴ Institute of Earth Surface Dynamics, University of Lausanne, Géopolis, CH-1015 Lausanne, Switzerland. ⁵ Sorbonne Université, MNHN, CNRS, Centre de Recherche sur la Paléobiodiversité et les Paléoenvironnements, CR2P, F-75005 Paris, France

The Oceanic Anoxic Event 2 (OAE2, ca. 94.6 Ma) is one of the major perturbations in the global carbon cycle during the Phanerozoic. Stable carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}$) from marine and continental sedimentary environments document this carbon cycle perturbation with a pronounced ($> 2\%$) positive carbon isotope excursion (CIE). Although the OAE2 stratigraphic interval has been intensively studied in terms of paleoceanography and paleoclimatology, several biotic, climatic and carbon-cycle aspects are not yet well- understood. In particular, cyclic short-term $\delta^{13}\text{C}$ variations within the OAE2 and their potential implications for the global carbon cycle have been rarely addressed.

Here, we present high-resolution (5 cm, ~ 2 kyr) $\delta^{13}\text{C}$ data spanning the OAE2 from the Paris Basin Chalk (Poigny Craie-701 drill-core) to show high amplitude short-term $\delta^{13}\text{C}$ oscillations, superimposed on the major CIE. Time-series analysis indicates that short-term oscillations are astronomically paced, with eccentricity cycles being the most prominent. We suggest that orbitally paced carbon cycle oscillations were amplified by considerable emission of greenhouse gases from volcanism that caused the overall CIE.

Cyclostratigraphic correlations among several OAE2 key records indicate that the entry of *W. devonense* ammonite, which defines the Cenomanian-Turonian boundary (CTB), was at least 200 kyr later in the Western Interior Basin (WIB, USA) than in Europe (Anglo-Paris and Lower Saxony basins). Key calcareous nannofossil biohorizons (e.g., *Quadrum gartneri*) are also stratigraphically upshifted in the WIB with respect to the European sections, hence further supporting a younger CTB in the WIB. We ascribe such significant temporal offset to diachroneity of the CTB, which is likely the result of different, regional biotic responses to the global OAE2 paleoenvironmental perturbation.

Keywords: OAE2, Cenomanian-Turonian boundary, diachroneity, carbon cycle, volcanically amplified eccentricity record, Anglo-Paris Basin.

This work was published in *Global and Planetary Change*:

Boulila, S., Charbonnier, G., Spangenberg, J.E., Gardin, S., Galbrun, B., Briard, J., Le Callonnec, L., 2020. Unraveling short- and long-term carbon cycle variations during the Oceanic Anoxic Event 2 from the Paris Basin Chalk. *Global and Planetary Change* 186, 103126.



Obliquity pacing of the hydrological cycle during the Oceanic Anoxic Event 2

Guillaume Charbonnier ^{*1,2}, Slah Boulila ^{2,3}, Jorge E. Spangenberg ⁴, Thierry Adatte ¹, Karl B.Föllmi ¹, Jacques Laskar ³

¹ Institute of Earth Sciences, University of Lausanne, Géopolis, CH-1015 Lausanne, Switzerland

² Sorbonne Université, Institut des Sciences de la Terre Paris, ISTeP UMR 7193, F-75005 Paris, France.

³ ASD, IMCCE-CNRS UMR 8028, Observatoire de Paris, PSL Research University, Sorbonne Université, 77 avenue Denfert-Rochereau, 75014 Paris, France.

⁴ Institute of Earth Surface Dynamics, University of Lausanne, Géopolis, CH-1015 Lausanne, Switzerland.

The Oceanic Anoxic Event 2 (OAE2, ca. ~93.5 Ma) represents a major phase of environmental change during the Mesozoic, and is associated with a pronounced positive excursion in the carbon-isotope record. Short-term climate oscillations within the OAE2 are recorded as Milankovitch cycles, which have been used to establish a precise temporal framework for the OAE2. However, few studies discuss the sedimentary expression of Milankovitch cycles during the OAE2, and its paleoenvironmental implications. Here we present carbonate and organic-carbon isotope data from a biostratigraphically well-dated, organic-rich OAE2 interval in a sedimentary succession outcropping in the Briançonnais Domain at Roter Sattel (Fribourg Prealps, Switzerland). We sampled the OAE2 interval (4.28 m) for proxies of detrital sediment quantification (Al, Ti, magnetic susceptibility) at ultra- high resolution (1 cm). Time-series analysis of multiple detrital proxies permits the construction of an orbital timescale for the OAE2 based, for the first time, on the stable 173 kyr (s3–s6) obliquity modulation cycle. The resulting OAE2 orbital timescale at Roter Sattel is consistent with previous timescales obtained in the Western Interior Basin, and in southern Tibet (China). Our cyclostratigraphic results show an unusually strong obliquity signal during the initiation of OAE2. Previous studies have demonstrated that the onset of OAE2 was associated with magmatic pulses coupled with increases in atmospheric $p\text{CO}_2$, followed by an overall, gradual drawdown of CO_2 . Accordingly, we suggest that detrital input during the OAE2 was the result of intensified continental weathering related to magmatic activity, the substantially release of greenhouse gases, and an accelerated hydrological cycle modulated by obliquity cycles.

Keywords: OAE2, s3–s6 orbital timescale, obliquity forcing, continental weathering, hydrological cycle.



Rhétien “court” ou Rhétien “long” ? Calibration astronomique de sections de référence en Autriche

Bruno Galbrun ^{*1}, Slah Boulila ¹, Leopold Krystyn ², Sylvain Richoz^{3,4}, Silvia Gardin ⁵, Annachiara Bartolini ⁵, Martin Maslo ²

¹ Sorbonne Université - CNRS - Institut des Sciences de la Terre-Paris - France

² University of Vienna - Department of Paleontology - Vienna - Autriche

³ Institute of Earth Sciences - NAWI Graz - University of Graz – Graz - Autriche

⁴ Department of Geology - Lund University – Lund - Suède

⁵ Sorbonne Université, MNHN, CNRS, Centre de Recherche en Paléontologie-Paris – France

L'établissement de l'échelle des temps géologiques du Trias supérieur donne lieu à de multiples controverses depuis des décennies, en particulier en ce qui concerne la durée du Rhétien, dernier étage du Trias. A cet égard, l'échelle de polarité magnétique astronomiquement calibrée, établie sur les séries continentales Trias supérieur du Newark Basin (Nord-Est USA), est considérée comme la référence, malgré des questions sur la continuité de l'enregistrement et les analyses cyclostratigraphiques. De nombreux schémas de corrélations magnétostratigraphiques ont été proposés entre cet enregistrement continental, essentiellement daté par pollens et faunes de vertébrés, et des séries marines téthysiennes bien datées par ammonites et conodontes. Ceci a conduit à deux principales hypothèses: un Rhétien “court” d'une durée d'environ 4-5 millions d'années, et un Rhétien “long” de 8-9 ma. Une calibration astronomique du Rhétien téthysien et une estimation de sa durée sont nécessaires pour progresser dans ce débat.

Nous avons entrepris l'analyse cyclostratigraphique d'un enregistrement composite du Rhétien des Alpes calcaires d'Autriche. Cet enregistrement marin (daté par ammonites et conodontes), épais de 131 m, résulte du recouvrement de 4 sections de référence: Steinbergkogel (candidat GSSP du Rhétien), Zlambach, Eiberg, Kuhjoch (GSSP Hettangien). Les variations de susceptibilité magnétique, mesurée tous les 10 cm, ont servi de support pour l'analyse cyclostratigraphique. Les paramètres de l'orbite terrestre, précession et excentricité, ont été identifiés dans l'enregistrement.

La calibration astronomique à l'aide de la composante d'excentricité de 405 ka permet d'établir une échelle de temps flottante, et de suggérer une durée minimale du Rhétien de 6.69 ma. Cette durée est donc “intermédiaire” entre un Rhétien “court” et un Rhétien “long”. L'âge bien établi à 201.36 Ma de la limite Rhétien-Hettangien (Trias-Jurassique) permet donc de suggérer un âge pas plus jeune que 208.05 Ma pour la limite Norien-Rhétien. Ce résultat contribue à notablement affiner l'échelle des temps du Trias supérieur, mais il ne permet pas de trancher entre les différents schémas magnétostratigraphiques proposés entre le Newark Basin et les séries téthysiennes, ni de conclure sur la très controversée question de la continuité de l'enregistrement, dit de référence, du Rhétien du Newark Basin.

Galbrun B., Boulila S., Krystyn L., Richoz S., Gardin S., Bartolini A. & Maslo M. (2020) - « Short » or « long » Rhaetian ? Astronomical calibration of Austrian key sections.

Global Planet. Change,

doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103253

Mots-Clés : Rhétien, Trias, Alpes calcaires, susceptibilité magnétique, cyclostratigraphie, calibration astronomique



Early Jurassic palaeoclimate and time: integrated astrochronology for the Sinemurian (Lower Jurassic) from UK outcrop and core

Alexander J.L. Hudson^{a*}; James B. Riding^b; Aisha Al-Suwaidi^c; Clemens. V. Ullmann^a; Dominika Szucs D^a; Stephen P. Hesselbo^a

^a Camborne School of Mines, University of Exeter, Penryn Campus, Penryn, Cornwall TR10 9FE,

^b British Geological Survey, Environmental Science Centre, Keyworth, Nottingham NG12 5GG

^c Department of Geosciences, Khalifa University, PO Box 2533, Abu Dhabi, United Arab Emirates

Climate research in the Jurassic has historically focused on geologically short, large-scale events such as the Triassic-Jurassic boundary mass extinction and the Toarcian Oceanic Anoxic Event. However, the climate system in the remaining 17 Myr of the Early Jurassic is significantly under studied, this despite the identification of several smaller magnitude and less well understood carbon-cycle perturbations such as the ‘Liasidium Event’ (*obtusum*- *oxynotum* zones, Sinemurian) and the Sinemurian-Pliensbachian boundary event. The paucity of long, multi-proxy integrated astrochronological studies across this interval has restricted understanding of the temporal relationships and driving factors associated with these events. In addition, there are stages of the early Jurassic with either no robust (Sinemurian) or contentious, astrochronology (Hettangian, Toarcian). As part of the multi- faceted Early Jurassic Timescale and Earth System project (JET), we provide new, high- resolution, multi-proxy datasets for the Sinemurian and Early Pliensbachian stages from shallow marine strata exposed in outcrop (Robin Hoods Bay, Yorkshire) and British Geological Survey stratigraphic boreholes (Mochras, Cardigan Bay and Burton Row, Somerset, UK). Carbon-isotope stratigraphy ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) is complemented with elemental analysis (portable XRF), Rock Eval, and Mercury datasets to understand the long-term carbon cycle and environmental evolution. The study aims to contextualise climatic changes in the Sinemurian and provide an astronomical framework in which to interpret these events. Results show two large, negative CIE’s in the mid Sinemurian, *obtusum* Zone (4‰ –ve CIE) and, second, the broader CIE in the *jamesoni* Zone, early Pliensbachian (3‰ –ve CIE). Both CIE’s are associated with significant organic matter enrichment with anoxic to dysoxic conditions, however the severity of anoxia appears to be spatially inconsistent between study sections. Time series analysis confirms the presence of Milankovitch cyclicity and is used to estimate the duration of the Sinemurian stage and the climatic perturbations within. Integrating cyclostratigraphy and sequence stratigraphy from several study sections, addresses the problem of cryptic sub-biostratigraphic hiatuses.

Keywords: Astrochronology, Jurassic, Time, Climate, Stratigraphy, JET



Astronomical Solutions for Geological Studies. The AstroGeo project

Jacques Laskar ^{*1}

¹ IMCCE, CNRS UMR8028, Observatoire de Paris, PSL Université, Sorbonne Université - France

According to Milankovitch's theory (1941), the large climatic changes of the past are due to the variations of the Earth's orbit and its axis of rotation, resulting from the gravitational attraction of the other planets and the Moon. These variations can be traced over millions of years (Ma) in sedimentary records, although the mechanisms that transfer insolation to geological variations are not precisely known. After the pioneering work of Hays et al (1976), the stratigraphic community has invested in the search for this astronomical imprint. In recent decades, the orbital and rotational solutions of the Earth developed in my team have been used to establish a geological time scale for the Neogene (0-23 Ma), an effort that is currently continuing towards the Paleogene (23 Ma- 66 Ma). Nevertheless, the extension of these works on the Mesozoic era (66-250 Ma) and beyond is difficult, because the movement of the solar system is chaotic. It is indeed not possible to find the precise orbital movement of the planets beyond 60 Ma from their current state. AstroGeo aims to go beyond this 60 Ma predictability horizon and to provide the basis for an astronomical solution over a large part of geological time. This will only be possible by using the input geological data, in order to constrain the astronomical solution. Geological records will be used to trace not only the evolution of Earth's orbit, but of all the planets in the solar system.

Mots-Clés : Paleoclimates, Cyclostratigraphy, Planetary motion, Milankovitch cycles, Chaos.



TOWARDS AN EARLY JURASSIC NUMERICAL TIME SCALE: MOCHRAS FARM BOREHOLE

Micha Ruhl ^{1,*}, Stephen P. Hesselbo ², Clemens V. Ullmann ²

¹ Department of Geology, Trinity College Dublin, The University of Dublin, Ireland

² Camborne School of Mines and Environment and Sustainability Institute, University of Exeter, Penryn Campus, UK

* Corresponding author: micha.ruhl@tcd.ie

The Early Jurassic (201.3 to 174.1 Ma) was initiated by the end-Triassic mass extinction and climatic perturbation (with significant global warming). It was followed by several smaller and larger climatic perturbations throughout the Sinemurian and Early Pliensbachian, a significant cooling event in the Late Pliensbachian, and culminating in the hothouse conditions of the Early Toarcian, coinciding with the Toarcian Oceanic Anoxic Event (T-OAE). The gradual evolution of Early Jurassic global climate, as well as superimposed rapid climatic perturbations appear to be closely linked to changes in the exogenic carbon cycle at that time, which are suggested to be linked to e.g. long and short-term astronomical control on Earth's energy distribution, opening and closure of ocean gateways and associated changes in ocean circulation, changing global weathering rates, a changing efficiency of the carbonate pump, the relative importance of overall marine and terrestrial carbon drawdown and burial, and carbon release from large igneous province volcanism and associated processes. To constrain the (causative) links and feedback mechanisms between these Earth system processes it is essential to understand durations and rates of change of perturbations in Earth system parameters.

Here, we present integrated carbon-isotope and elemental concentration data from the entire Lower Jurassic sedimentary succession of the Cardigan Bay Basin (Mochras Farm Borehole, UK). This expanded and biostratigraphically complete record allows for detailed (precession to short eccentricity-scale) constraints on the Early Jurassic time-scale. We use this to explore short and long-term orbital forcing of the climate and environment at this mid-latitude site.



Répartition paléobiogéographique des ostracodes dans le Campanien-Maastrichtien du Bassin des Aurès, Algérie

Benmansour Sana * 1&2, Andreu Bernard 3

¹Laboratoire : Mobilisation et Gestion des Ressources en Eau (MGRE), Université de Batna2 - Mustafa Ben Boulaid. ²Institut de sciences de la terre et de l'univers. Département de géologie, Université de Batna2 - Mustafa Ben Boulaid. ³GET (Geosciences Environnement Toulouse), Paul Sabatier University, Toulouse III, CNRS, IRD, OMP, 14 Av. E. Belin, F-31400 Toulouse, France

L'étude systématique des ostracodes dans le Bassin des Aurès, Algérie, a permis d'inventorier, 109 espèces d'ostracodes, appartenant à une cinquantaine de genres.

D'un point de vue biostratigraphique, nous n'avons pas mis en évidence d'association d'ostracodes typiquement campanienne ou maastrichtienne, mais une association regroupant plutôt ces deux étages.

D'un point de vue paléobiogéographique, la distribution des espèces d'ostracodes communes entre l'Algérie et les pays voisins, dans l'intervalle Santonien-Paléocène, nous permet de proposer 4 cartes sur lesquelles apparaissent deux provinces, présentes à chaque étage et série :

- i) la Province des Marges Sud et Sud -Ouest Téthysiennes, incluant l'Afrique du Nord, le Moyen-Orient et la péninsule Arabique ;
- ii) la province de la Marge Est Atlantique, correspondant à Afrique de l'ouest et du centre-ouest, avec des relations fauniques entre les différents pays ou régions qui constituent ces provinces, la migration des ostracodes suivant le sens des courants océaniques du Crétacé supérieur, et restant plus ou moins sous un même climat aride, subtropical à tropical. La dispersion des ostracodes montre la présence de communications marines entre ces provinces et l'Inde, le sud des USA et la Jamaïque, le Brésil et l'Europe.

Mots clés : Aurès, Algérie, ostracodes, paléobiogéographie.



Late Cambrian astronomically forced climate change

Nicolas Thibault^{1*}, Aske Sørensen², Arne T. Nielsen¹, Zhengfu Zao¹, Niels H. Schovsbo³, Tais W. Dahl²

¹ : IGN, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark

² : GLOBE Institute, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark

³ : Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS), Copenhagen, Denmark

Compelling evidence of orbital cycles across an 8.7 Myr interval of the late Cambrian is provided in core scanning X-ray fluorescence data of two cores from the Alum Shale Formation (Scandinavia). We provide robust evidence for precession, obliquity, short- and long-eccentricity cycles in pyrite-bound elements (S, Fe) and elements bound to clay minerals (Al, Ti, K, Si) in black shales that exhibit no visible sign of cyclicity. The obtained record enables the establishment of a floating astronomical time scale for the Miaolingian – Furongian interval from which the durations of trilobite biozones and the carbon isotope ‘SPICE’ event are precisely determined. Reconstructed sedimentation rates are consistent between the two cores and correlate negatively to the eustatic sea level curve. We also provide a key empirical constraint on the duration of the obliquity period at ~493 Ma of 31.4 ± 1.2 kyr. This constraint is used to calculate the Earth-Moon distance and Cambrian day length to

$368.9 \pm 2.3 \times 10^3$ km and 21.78 ± 0.29 hr, respectively. These numbers constrain the recession of the Moon and tests models for the long-term dynamic evolution of the Earth-Moon system. Finally, we discuss plausible drivers for the cyclic sedimentation of pyrite and clay minerals in the Alum Shale Formation with implications for paleoclimate models of an ice-free Early Paleozoic world.

Keywords : Late Cambrian, Furongian, Alum Shale, SPICE event, cyclostratigraphy, Earth-Moon distance



T14.2 Temps géologique – Ages radiochronologiques



Paroxysmal Deccan Eruptions linked to End-Cretaceous Mass Extinction

Thierry Adatte^{1*}, Gerta Keller², Jorge E. Spangenberg³, Paula Mateo⁴, Jahnavi Puneekar⁵, Blair Schoene², Kyle Samperton⁶, Michael P. Eddy⁷, Syed F.R. Khadri⁸, Sigal Abramovich⁹, Johannes Monkenbusch¹⁰, Nicolas Thibault¹⁰.

¹Institute of Earth Sciences, University of Lausanne, Switzerland.

²Department of Geosciences, Princeton University, USA.

³Institute of Earth Surface Dynamics, University of Lausanne, Switzerland.

⁴Division of Geological and Planetary Sciences, CALTECH, USA. ⁵Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai, 400 076, India.

⁶Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94550, USA.

⁷Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Purdue University, USA.

⁸Department of Geology, Amravati University, Amravati, India.

⁹Department of Geological and Environmental Sciences, Ben Gurion University, Israel.

¹⁰Department of Geosciences, University of Copenhagen, Denmark.

The Chicxulub impact in Mexico and Deccan volcanism in India are both linked to the end-Cretaceous mass extinction but the relative timing of the impact, volcanic eruptions, and environmental changes remain controversial, precluding a full assessment of their respective roles. Mercury anomalies within the stratigraphic record have recently been proposed as atmospheric fallout of continental large igneous provinces (LIPs), and these anomalies are associated with all five major mass extinctions in Earth's history. If this proxy is robust, it could provide a record of volcanism directly correlated to mass extinctions and in the case of the End-extinction, the Chicxulub impact. To test this hypothesis, we analyzed mercury in the late Maastrichtian from the base of C29r to the Cretaceous-Paleogene boundary (KPB) in the astronomically tuned Elles section in Tunisia, and correlate this chemostratigraphic record with recent high-precision U-Pb geochronology of Deccan volcanism. Our results support that Hg is a robust indicator of LIP volcanism, and directly links Deccan volcanism to rapid global climate changes, ocean acidification and increasing environmental stress during the last 320-340 kyr of the Maastrichtian. Furthermore, our time-resolved Hg record and U-Pb resolved eruption volumes reveal paroxysmal volcanic eruptions (~30% by volume) during the final 35 kyr leading up to the KPB mass extinction.

Deccan Traps volcanism, U-Pb ages; mercury stratigraphy; End-Cretaceous; mass extinction, warming



Utilisation de la datation U-Pb des carbonates par LA-ICPMS en chronostratigraphie : perspectives et limitations

Guilhem Hoareau ^{*1}

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour - E2S UPPA, CNRS, TOTAL, LFCR, UMR5150 - Pau – France

La datation des roches carbonatées par méthodes U-Pb est employée depuis plusieurs décennies. Malgré des résultats parfois très concluants en termes de précision, cette approche est restée plutôt confidentielle principalement en raison (i) de la difficulté de préparation des échantillons en laboratoire pour les analyses par voie liquide et (ii) de la sensibilité des carbonates à une altération post-dépôt. Le développement récent de la datation in situ des calcites par LA-ICPMS, qui permet l'obtention rapide d'âges de précipitation, ouvre des perspectives d'applications intéressantes pour la datation des dépôts carbonatés notamment en domaine continental. Nous discuterons ici, à travers des exemples issus de la littérature et de nos propres analyses sur des carbonates lacustres Pyrénéens, de l'intérêt de la datation U-Pb in situ des calcites pour la chronostratigraphie. Nous soulignerons également les limitations de cette approche, qui sont liées entre autres (i) à la recristallisation fréquente des carbonates pendant la diagenèse, (ii) leur faible concentration en uranium, (iii) les différences de comportement des échantillons pendant l'ablation et (iv) les incertitudes sur les âges obtenus qui ne peuvent théoriquement pas être inférieures à 3-4% avec les étalons actuellement disponibles. Le nombre croissant d'équipes travaillant sur le développement de la méthode, notamment l'obtention de nouveaux étalons carbonatés et l'extension vers la datation des dolomites, permet cependant d'envisager des datations précises et fiables rapidement.

Mots-Clés : Géochronologie, datation U-Pb, carbonates, ablation laser, chronostratigraphie



Apports récents de la datation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ à la chronostratigraphie du Quaternaire

Sébastien Nomade ^{*1}, Alison Pereira ², Hervé Guillou ¹, Vincent Scao ¹

¹ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, CEA/UVSQ/CNRS UMR 8212 Université Paris-Saclay CEA Orme des Merisiers, Bâtiment 714, 91198 Gif-sur-Yvette, France

² Géosciences Paris Sud, GEOPS Université Paris-Saclay, UMR 8148, Rue du Belvédère Bâtiment 504, 91400 Orsay

Les archives géologiques Quaternaires renferment des informations très importantes sur les variations climatiques passées, l'évolution des espèces, y compris la nôtre, mais aussi sur des événements géologiques tels que les éruptions volcaniques majeures, chutes de météorites, tsunamis... Depuis les années 90 des améliorations méthodologiques et techniques ont permis des progrès majeurs en matière de justesse et précision des datations $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, permettant ainsi la construction d'une chronologie plus précise et plus juste des enregistrements sédimentaires du Pléistocène Moyen et Inférieur au-delà des limites d'utilisation du ^{14}C .

Nous illustrerons ici, ces avancées par plusieurs exemples réalisés dans notre laboratoire ces cinq dernières années, à savoir : 1) Les éruptions majeures des Champs Flégréens (Italy) depuis 40 ka notamment l'ignimbrite Campanienne; 2) la datation haute précision des tectites Australasiennes (788 ± 3 ka) ; 3) La limite Pléistocène inférieure/moyen et les problèmes autour de la datation de la dernière inversion du champs magnétique terrestre Matuyama/Brunhes ;4) La chronologie des changements culturels des hominidés du Pléistocène moyen en Europe de l'Ouest.

Mots-Clés : Quaternaire, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Pléistocène, éruptions volcaniques, évolution de l'homme.



Un nouveau modèle d'âge pour l'Autunien du bassin d'Autun à partir de datations U-Pb sur des tonsteins

Pierre Pellenard^{*1}, Mathilde Mercuzot², Georges Gand¹, Mark Schmitz³,
Céline Ducassou², Sylvie Bourquin², Laurent Beccaletto⁴

¹Laboratoire Biogéosciences, UMR CNRS 6282/uB, Université Bourgogne Franche-Comté, France

²Géosciences Rennes - UMR 6118, Université Rennes 1, CNRS, France

³Isotope Geology Laboratory, Boise State University, USA

⁴BRGM, Georesources Division, Orléans, France

Le bassin d'Autun, bassin historique français stéphanien-permien connu pour ses huiles de schistes et ses fossiles de plantes et vertébrés terrestres, a permis de définir le stratotype Autunien au 19^{ème} siècle, référence pour les « étages » continentaux du Permien d'Europe. Pendant très longtemps, les âges du bassin et du stratotype Autunien ont reposé sur les biozonations établies par les microflore et macroflore, plus récemment à partir des faunes d'insectes, de crustacés et d'amphibiens (Schneider et al., 2020). L'équivalence d'âge en étages marins reposait sur des corrélations complexes à partir d'environnements mixtes marins et continentaux permettant d'utiliser, entre autres, les foraminifères fusulinacés du genre *Schwagerina*. S'il était admis que l'Autunien inférieur, surmontant le Stéphanien B à la base du bassin d'Autun, démarrait bien dans le Carbonifère terminal (étage Gzhélien), le sommet du bassin (Autunien supérieur) a été proposé comme un équivalent de l'étage Sakmarien voire de l'Artinskien et mis en correspondance avec les faciès « rouges » du bassin de Lodève. Les récentes datations U-Pb sur zircons par la méthode CA-ID-TIMS (Pellenard et al., 2017) ont permis de confirmer l'âge Gzhélien pour l'Autunien basal (~299,9 Ma) et de placer la limite Carbonifère-Permien (Gzhélien-Assélien) au sein de la couche riche en matière organique de Lally à partir de tonsteins intercalés dans les argilites carbonées (âge à 298,91±0,08 Ma). De nouveaux âges CA-ID-TIMS issus de tonsteins des formations de l'Autunien supérieur (298,39±0,09 et 297,7±0,08 Ma) permettent de montrer que le sommet de l'Autunien n'a vraisemblablement pas dépassé un âge Assélien et que la durée des dépôts issus de ce bassin doit être considérablement revue à la baisse (i.e. <2,5 Ma contre ~10 Ma précédemment). Cela implique des taux de sédimentation forts (0,4-0,5 mm/an sans décompaction ; 0,9-1,3 mm/an avec décompaction) mais qui restent parfaitement cohérents avec les valeurs moyennes de lacs en contexte tectoniquement actif, environnement de dépôt et contexte dominants pour les sédiments du bassin d'Autun (Mercuzot, 2020). Ces âges U-Pb CA-ID-TIMS sont cohérents avec les âges LA-ICP-MS établis sur d'autres niveaux volcaniques du bassin bien que les marges d'erreurs soient plus importantes. Ils permettent dorénavant d'envisager des corrélations avec les bassins stéphanien-permiens récemment datés au nord du Massif central (Ducassou et al., 2019) et de reconstituer plus précisément l'histoire géodynamique de ces bassins.

Ducassou, C. et al. (2019). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 533, 109228.

Mercuzot, M., (2020). Thèse, Université de Rennes 1.

Pellenard, P. et al. (2017). *Gondwana Research*, 51, 118-136.

Schneider, J. W. et al. (2020). *Palaeoworld*, 29, 186-238.

Mots-Clés : Datations CA-ID-TIMS, tonsteins, bassin d'Autun, Carbonifère, Permien



Precise U-Pb geochronology for high resolution correlation of geological, environmental and biological events in Earth's history

Urs Schaltegger

Université de Genève, Sciences de la Terre, 1205 Genève, Suisse

To study the history of the geological past of our planet we need to employ techniques that deliver absolute time markers in the stratigraphic record. These allow for correlation between sedimentary records on different continents, and between different environmental and ecological environments. Furthermore, it can add absolute time to the calibration of biochronology, by temporal linking of different subspecies or endemic fossil species where well-defined index species are lacking.

The “golden spike” of geochronology is the U-Pb dating technique, applied to the mineral zircon (ZrSiO_4) that resides in volcanic ash beds interlayered with the sediments we want to study. The technique of chemical abrasion, isotope dilution, thermal ionization mass spectrometry (CA-ID-TIMS) has been developed since 2005 to an unprecedented precision and accuracy of 0.05% for $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ dates (Schaltegger et al., 2015). A large part of this development is due to the joint effort of the international EARTHTIME consortium (Bowring et al., 2005).

The established precision can now be used to target a series of scientific questions that were impossible to tackle before because of the lack of temporal resolution: (i) precise dating of geological boundaries; (ii) dating of major biotic and environmental turnovers (“mass extinctions”), and their precise correlation with volcanic events of large igneous provinces; (iii) contribute to improved biochronological schemes by adding absolute time; (iv) study the timescales of environmental change through age calibration of stable isotope and chemical time series, and link them to volcanic events, erosional feedback and orbital forcing.

The talk will highlight some prominent applications and will demonstrate that working at the 0.05% precision level of time resolution in the geological past requires a tight control on all parameters of the U-Pb dating technique.

References: Bowring et al. (2005) *Geochim. Cosmochim. Acta* 69, A316; Schaltegger et al. (2015) *Chem. Geol.* 402, 89-110

Mots-Clés : U-Pb dating, high-precision geochronology, zircon, ash beds, mass extinctions



Géochronologie U-Pb sur calcite appliquée à la lithification des hardgrounds et à la datation des limites de séquences stratigraphiques

Benjamin Brigaud^{1*}, Simon Andrieu², Thomas Blaise¹, Frédéric Haurine¹,
Jocelyn Barbarand¹

¹Université Paris-Saclay, CNRS, GEOPS, 91405 Orsay, France

²BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans, France

Les discontinuités de type hardground sur les plates-formes carbonatées forment d'importantes surfaces stratigraphiques qui peuvent être utilisées à l'échelle du bassin pour corréler les limites des séquences stratigraphiques. Bien que ces surfaces soient couramment utilisées en stratigraphie séquentielle, le moment et la durée de leur lithification et de la cristallisation des premiers ciments restent peu explorés. Dans cette étude, les premiers ciments calcitiques obturant l'espace inter-granulaire des carbonates du Jurassique des bassins de Paris et d'Aquitaine ont été datés par géochronologie U-Pb dans cinq hardgrounds. La position stratigraphique, le cadre séquentiel à haute résolution et leur contexte sédimentologique permettent d'attribuer ces hardgrounds à des limites de séquence de 3^{ème} ordre, correspondant à des limites de type maximum regressive surface. La cohérence ou la légère déviation entre l'âge des ciments et l'âge stratigraphique des discontinuités illustre le fait que la cimentation s'est produite au début de l'histoire diagénétique. Les âges obtenus sur les ciments en dents de chien (âge à 163.5 ± 6.0 Ma, soit $\pm 3.7\%$ à 2σ) et les ciments microstalactitiques (âge à 164.0 ± 9 Ma, $\pm 5.5\%$ à 2σ) sont très cohérents avec les âges supposés de la sédimentation contrainte à la précision des zones biostratigraphiques à ammonites. Cela permet d'entrevoir que la géochronologie in situ U-Pb sur calcite serait une méthode prometteuse pour dater les limites des séquences de dépôt et affiner, dans le futur, l'échelle des temps géologique du Jurassique.

Mots-Clés : Géochronologie, U-Pb, Calcite, Jurassique



T15.1 Fluides juvéniles hydrothermaux dans la croûte continentale et leurs rôles dans les dépôts de minerais



Geochemistry and P-T conditions of hydrothermal fluids associated with the Upper Miocene post-collisional magmatism at Wadi Belif (Northwestern Tunisia): Origin of metals and trace gold mineralization

Wiem Ben Aissa ^{*1,2}, Véronique Gardien ², Rania Ben Aissa ¹, Abdesslem Ben Haj Amara ¹, Lassaad Ben Aissa ¹

¹ Laboratory of Materials Resource and Ecosystem, University of Carthage, Faculty of Science of Bizerte, Tunisia

² LGL-TPE, UMR CNRS 5276 Université Claude Bernard Lyon 1/ENS-Lyon, France

In Nefza mining district (Northern Tunisia), post collisional hydrothermal activity is manifested by exhumed porphyry-Cu (Au) breccia, epithermal Fe rich veins and phlogopite- rich skarn deposits (Ben Aissa et al. 2020). Regional surface geochemical prospecting and mapping indicate that poly-metallic anomalies are preferably localized along NNE-SSW and ENE-WSW directions that coincide with the major fault directions and the post-collisional magmatic outcrops of the region. Chemism is dominated by a matter transfer influenced by mantellic affinity elements (Ni, Co) and argues in favor of the deep rooting of these faults. Microthermometric measurements indicate that P-T trapping conditions are P= 38 MPa to 50 MPa, T= 198.22 to 259°C for epithermal phase and P= 110.0 MPa, T= 568 to 384°C with salinities ranging between 33.85 -50.84 wt% NaCl equiv for the porphyry-Cu (Au) phase. Such high salinity values indicate the prevalence of magmatic origin of fluids exsolved during mineralizing process. Geochemical spider diagrams normalized to the upper continental crust showed three types of geochemical associations: (1) Au-Sb-(Ag-U) association for the porphyry -Cu (Au) phase, (2) As-Au (U) association for the Fe rich breccia and (3) As-Sb-Fe-(U) association for the epithermal Fe rich phase. These associations confirm the deep origin of metals that originated from a deeper level than the upper continental crust. La = f (As, Bi, U, Th, Pb and Ba) diagrams indicate the correlation between the degree of REE fractionation expressed by the high La content and the enrichment of mineralization in the majority of the metallic elements, reflecting the effect of hydrothermal leaching and metal transfer. Fe, Zn, Cu, Ti, S, As, Sr, Ba, Te, Se, Ag, Sn, Bi, Mo, W, U, Hg = f (Au) diagrams showed two populations. The first population linked with epithermal phase where Au content do not exceed generally 200 ppb, and where Au is correlated with a large number of elements and a second population linked with porphyry (Au) phase where Au content can exceed 200 ppb up to 850 ppb and correlate with a limited number of elements including Mo, U, Sn, Fe, (Bi, Cu).

Mots-Clés : porphyry-Cu (Au), epithermalism, fluid inclusions, geochemical mapping, gold



Tourmalinisation en contexte granitique peralumineux et pélitique: de l'expérimentation au modèle thermodynamique.

Julien Fort ^{*1}, Stanislas Sizaret ¹, Michel Pichavant ¹, Arnault Lassin ², Philippe Blanc ², Johann Tuduri ², Olivier Blein ²

¹ ISTO – Université d'Orléans – France

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

Parce que ses zonations chimiques primaires sont rarement rééquilibrées, la présence de tourmaline en tant que produit d'altération constitue un élément déterminant pour contraindre les propriétés physico-chimiques des fluides minéralisateurs. Cependant le rôle de la tourmalinisation dans les processus hydrothermaux reste peu étudié voire mal compris, du fait de la complexité à intégrer ce minéral dans les bases de données thermodynamiques (Henry & Dutrow, 2018). La présence de quatre sites cationiques différents permettant l'accommodation d'une large variété d'ions et les phénomènes de déprotonation, de substitutions Si-B^{IV} et d'état de valence (Morgan, 2016), rendent complexe l'approche des solutions solides. Ainsi les propriétés thermodynamiques sont le plus souvent estimées (Van Hinsberg & Schumacher, 2007; Wodara & Schreyer, 2001; Garofalo et al., 2000) et seules quelques mesures ont pu être réalisées sur un nombre réduit de pôles purs (Ogorodova et al., 2012; Kuyunko et al., 1984).

Cette étude propose de définir le champ de stabilité de la solution solide schorl (Na-Fe) – dravite (Na-Mg) à haute température (500-600°C), pour diverses teneurs en B₂O₃ initiale dans la phase fluide, à pression constante et fO₂ fixée. Des synthèses hydrothermales en autoclave à chauffage interne ont été menées sur deux types de produits de départ : une composition granitique peralumineuse (cordiérite + albite) dominée par le Mg, et une composition pélitique (biotite + albite) dominée par le Fe. Ces expérimentations ont été conduites afin de simuler les encaissants classiques alumineux de ces altérations à tourmaline en contexte perigranitique. Les résultats seront comparés aux modèles thermodynamiques construits à partir des données de la littérature pour ces environnements. In fine l'objectif est de caractériser dans un espace P, T, W/R, l'évolution chimique des fluides, la séquence d'altération des roches et les variations de volumes liées aux réactions.

Mots-Clés : Tourmaline, Expérimentation, Modélisation géochimique, Fluides hydrothermaux



L'indice De Fer De M'taguinarou Nord (Sud De Tébessa-Nord- Est De L'Algérie) : Géologie, Géochimie, Minéralogie Et Contexte Structural.

Fakher-Eddine Messaoudi*

Laboratory of Geodynamics and Natural Resources-LGRN – Badji Mokhtar University, Algeria

L'indice de fer M'Taguinarou Nord renferme une minéralisation polymétallique et ferrière (Fe- Zn-Cu), encaissée dans des calcaires turoniens. Elle se manifeste en amas métriques de goethite, et d'hématite et également en veines centimétriques de smithsonite, de malachite et d'azurite. La genèse de cette minéralisation est clairement polyphasée et résulte des processus supergènes superposés à des phases hydrothermales où la mise en place des diapirs triasiques a probablement généré la circulation des fluides hydrothermaux à travers la série sédimentaire et l'altération des calcaires turoniens a donné lieu à la formation du minerai primaire hydrothermal composé de carbonates de fer (sidérite). Plusieurs épisodes de soulèvement ont affectés la minéralisation et les roches encaissantes, générant la genèse d'un assemblage polymétallique supergène (goethite, malachite, azurite, quartz et calcite). Dans cet indice, les oxy-hydroxydes de fer sont, principalement, observés sous forme de structures fibreuses, de stalactites, de stalagmites et de mamelons (Botrydale). L'hématite y a précipité en premier, suivie rapidement par la goethite, la limonite et la smithsonite. On y note l'absence totale des traces de sidérite. Par la suite, la malachite, l'azurite et la calcite se sont formés sous forme de veines millimétriques recoupant les calcaires encaissants.

Mots-clés : Minéralisation, Modèle génétique, Fer hydrothermale / Supergène, M'Taguinarou Nord, Tébessa, Algérie



T15.2 Interaction between deformation and reaction mechanisms throughout the lithosphere



Element mobility in low-grade shear zones and strain accommodation: insights from geochemistry and microstructures of granitoids of central Pyrenees (Axial zone)

Khadija Alaoui^{1*}, Laura Airaghi¹, Benoît Dubacq², Nicolas Bellahsen²,
Claudio Rosenberg²

¹ Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO), UMR 7327, CNRS-BRGM, Université d'Orléans, 45071, Orléans, France

² Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTEP), UMR 7193, CNRS-INSU, Sorbonne Université, 75005, Paris, France

Shear zones developed in greenschist-facies conditions are often considered as open geochemical systems and preferential pathways for fluid percolation that favours the syn-kinematic growth of weak phases (i.e. phyllosilicates) and strain localisation. However, differences in the geochemical behaviour of low-grade shear zones are observed, with potential implications on strain accommodation from sample to an outcrop scale. In the Axial zone of the Pyrenees, the Bielsa and Maladeta granitoids are altered and deformed in greenschist-facies conditions at 250-350°C (chlorite thermometry). While shear zones of Bielsa are spaced of ~100-200 m and organised in an anastomosed net, in Maladeta they are spaced of ~1.5 km, leaving large parts of the granite undeformed. At microscopic scale, quartz shows little recrystallisation by bulging in Bielsa mylonites and intra-grain misorientation of parent quartz grains up to 40°. In Maladeta mylonites, pervasive recrystallisation of quartz by subgrain rotation is instead observed. New grains have no internal misorientation and relicts of parent quartz grains exhibit subgrains of a similar size of recrystallised grains. Pervasive alteration is observed in Bielsa granitoid, with more than ~50 % volume of mylonites made of interconnected white mica grains, while in Maladeta the magmatic mineral assemblage is largely preserved and white mica forms less than 30 % volume of high strain samples. Major, minor and trace element geochemistry across Bielsa shear zones show systematic loss up to 50% of Na and K and variations in Ca due to feldspar breakdown and Ca-bearing fluid circulation, pointing to an open system behaviour relative to these elements during deformation. In contrast, across Maladeta shear zone, no systematic element loss or gain is observed, but only lateral element migration suggesting a “closer” system behaviour during shearing. The similarity of temperature ranges estimated for deformation and of the overall strain intensity in high strain samples of both massifs show that quartz recrystallisation mechanisms are not primarily controlled by temperature differences but they likely depend on the ratios between weak (phyllosilicates) and strong mineral phases (feldspar, quartz). Pervasive fluid percolation promotes abundant white mica growth around quartz grains in Bielsa, preventing quartz recrystallisation and favouring strain distribution in micas at an outcrop scale. Localised fluid percolation in Maladeta prevents pervasive white mica growth and preserves frequent quartz-quartz grain boundaries, thus favouring quartz recrystallisation and extreme strain localisation at an outcrop scale. Since white mica growth is closely related to fluid percolation and alteration, in the case of Bielsa and Maladeta granitoids, different “openness” of the low-grade shear zones appear to control the microstructures at the sample scale up to an outcrop scale.

Keywords: Greenschist-facies shear zone – Mass transfer – Quartz deformation- Axial zone



Microstructures of the active Karakorum Fault: Can we discriminate earthquake-rupture related markers from aseismic creeping ones?

T. Cavailhes^{1*}, V. Allègre², R. Le Roux-Mallouf³, L. Lucas¹, M-L. Chevalier⁴, V. Adlakha⁵

¹ UMR CNRS 5805 EPOC – OASU, Université de Bordeaux, France

² Université de Bordeaux, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France.

³ Geolithe, Research and Development Department, Rue des Becasses, 38920, Crolles, France

⁴ Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 26 Baiwanzhuang Rd, Beijing 100037, People's Republic of China

⁵ Structure and Tectonics Group, Wadia Institute of Himalayan Geology, India

Discriminating the microstructural markers related to earthquake-rupture (slip rate $\sim \text{m.s}^{-1}$) from those associated with aseismic creep (slip rate $\sim \text{mm.yr}^{-1}$) along active faults remains an important challenge to assess the partitioning in sliding behaviours. In this contribution, we report the discovery of striated fault surfaces (m^2) and their associated fault rocks in an underground quarry, both accommodating a significant part of the dextral movement of the lithospheric Karakorum Fault (KF). The quarry is located at the southern tip of the longest KF segment ($\sim 407 \text{ km}$) where GPS data suggest $\sim 12 \text{ mm.yr}^{-1}$ of deformation, while seismic catalogs report three earthquakes of moderate magnitude ($M_w < 6$), attesting to seismic slip.

The $> 100 \text{ m}$ wide KF zone cuts a granite protolith composed of highly brecciated quartz and feldspars grains, feldspar-derived phyllosilicates, as well as abundant quartz banded cementation related to the KF early stage of deformation. Early-stage deformation style developed when the fault rocks formed below 3 km -depth (i.e., quartz cementation). This relatively “weak” granitic rock represents the fault rock protolith (pre-state deformation). A well-defined fault plane, interpreted to represent the most recent morphotectonic marker of deformation, traps a 10 m -thick wedge of quaternary sediments where we sampled for radiocarbon dating. A clay-rich fault plane located at 10 m -deep shows 4 distinct groups of striations, which we categorized according to orientation, sharpness and degree of preservation. The cm-scale S-C structures made of foliated gouges and gypsum augen structures surrounding this fault surface are consistently oriented along fault creeping kinematics. Consequently, the main arguments for a ‘creeping behavior’ are the presence of S-C structures of clay-rich fault gouge and augen/nodular gypsum, and regularly scratched and well-defined striation showing dextral kinematics. However, the ‘seismic behavior’ seems to be recorded by: (i) several groups of striations on the most recent fault surface, exhibiting specific curved geometries and four different directions. (ii) gypsum injection predating the creeping structures; (iii) cataclastic mechanisms of deformation of quartz-rich units.

Keywords: fault, creeping, friction, gypsum, Karakorum fault



Les failles dans les roches volcanoclastiques : impact de la déformation sur les propriétés petrophysiques d'une roche poreuse.

Etienne Leroy ^{*1}, Thibault Cavailhes ¹, Yannick Anguy ², Cécile Gaborieau ², Atle Rotevatn ³

¹ UMR EPOC - Université de Bordeaux – France

² I2M – Université de Bordeaux/CNRS – France

³ Department of Earth Sciences – University of Bergen - Norway

Ce travail (i) documente l'expression des réseaux de failles dans les volcanoclastites poreuses et (ii) discute leurs effets sur les propriétés réservoirs et les circulations de fluides associées.

La déformation affectant les roches poreuses ($\phi > 15\%$) s'exprime par la présence de bandes de déformation cataclastiques (CDB) dans lesquelles une réduction de granulométrie est provoquée par (i) la rotation des grains, (ii) la fracturation intragranulaire et (iii) transgranulaire. Ces mécanismes engendrent une réduction de porosité et de perméabilité. Peu d'attention a été portée sur les CDB affectant les volcanoclastites et ce malgré l'intérêt croissant de la communauté scientifique pour les réservoirs volcanosédimentaires.

L'île volcanique de Milos se situe dans les Cyclades, domaine affecté par la subduction africaine et l'extension arrière-arc en mer Egée. Les failles étudiées affectent des grès volcanoclastiques néogènes du N de l'île, essentiellement composés de verres andésitiques.

Le réseau de fractures se compose de quatre familles d'hétérogénéités structurales orientées N70, N95, N15 et N160 et montrant toutes un pendage de $\sim 75-90^\circ$. Ces systèmes en transtension présentent (i) des clusters de bandes de déformation d'épaisseurs centimétriques et (ii) des bandes anastomosées d'épaisseur millimétrique. L'orientation et la chronologie des différentes familles sont cohérentes avec la dynamique régionale et les déformations péri-volcaniques post-Pliocène.

A l'échelle de l'échantillon, la *core zone* fait ~ 4.6 mm d'épaisseur et la *damage zone* ~ 1 mm. Les bandes présentent une morphologie interne anastomosée où les brins sont de nature cataclasite et protocatasite. Le *cataclastic flow* apparaît comme le principal mécanisme de déformation, induisant une réduction de granulométrie ($42 \mu\text{m} \rightarrow 23 \mu\text{m}$) et donc de porosité ($28\% \rightarrow 4\%$) dans la bande par rapport à l'encaissant.

Des filaments d'argiles (Illite) micrométriques sont observés et représentent la trace de l'altération du verre volcanique. Ils sont préférentiellement localisés dans la CDB et démontrent un degré d'altération élevé favorisé par les surfaces réactionnelles fraîches. Une minéralisation d'Halite en périphérie de CDB indique une circulation ultérieure d'eau de mer en zone vadose, guidée par les hétérogénéités structurales.

Mots-Clés : Bandes de déformations ; volcanoclastique ; géologie structurale ; pétrophysique ; Milos





T16.1 Objets, données et images des collections, patrimoine scientifique ex-situ



La constitution de la collection de crustacés fossiles au Muséum national d'Histoire naturelle, Paris : 1750-1880

Sylvain Charbonnier^{1*}

¹ UMR 7207 Centre de Recherche en Paléontologie – Paris, CNRS-MNHN-Sorbonne Université, Muséum national d'Histoire naturelle, Département Origines & Evolution (CP 38), 8, rue Buffon, F-75005 PARIS - France

L'origine de la collection de crustacés fossiles du Muséum national d'Histoire naturelle s'enracine dans les cabinets de curiosités ou d'histoire naturelle constitués au 18^e siècle par différentes personnalités : scientifiques, aristocrates éclairés, grands collectionneurs, politiciens, officiers militaires, naturalistes régionaux. De nombreux cabinets privés se constituent alors dans l'Europe des Lumières où le « Grand Tour » est devenu un voyage traditionnel pour certains jeunes européens éclairés et fortunés. Avant la Révolution, le Cabinet du Roi est ainsi alimenté en crustacés fossiles par diverses sources comme les explorateurs et missionnaires (ex. : J.-F. Charpentier de Cossigny, P. Poivre) et les naturalistes régionaux (ex : J.-F. Séguier) qui envoient leurs spécimens au Jardin du Roi. Si la Révolution sonne la fin de très nombreux cabinets privés et entraîne la fondation du Muséum national d'Histoire naturelle en 1793, le tout début du 19^e siècle voit le maintien de quelques très grandes collections paléontologiques. C'est le cas de l'immense collection du Marquis de Drée, constituée par ses soins et par le rachat de plusieurs collections privées célèbres (ex : cabinet de Joubert, dernier trésorier des Etats du Languedoc) et dont une grande partie sera rachetée par l'administration française vers 1845. C'est aussi l'époque de la fondation d'une nouvelle discipline, la paléocarcinologie. A.-G. Desmarest est le premier à étudier scientifiquement les crustacés fossiles et à mettre en place une nomenclature spécifique pour les carapaces. Ses travaux pionniers sont suivis par ceux de la dynastie des Milne-Edwards qui accompagnera le rayonnement des sciences naturelles en France et en Europe pendant tout le 19^e siècle. A partir des années 1860 et pendant les 30 années qui suivent, A. Milne-Edwards donne ses lettres de noblesse à la paléocarcinologie et enrichit considérablement la collection de crustacés fossiles du Muséum qui dépasse alors les 1 000 spécimens.

Mots-Clés : Crustacea ; Decapoda ; paléontologie ; collections ; échantillons ; cabinet de curiosités ; muséum



Le déménagement des collections de paléontologie du Muséum national d'Histoire naturelle

Sylvain Charbonnier^{1*}

¹ UMR 7207 Centre de Recherche en Paléontologie – Paris, CNRS-MNHN-Sorbonne Université, Muséum national d'Histoire naturelle, Département Origines & Evolution (CP 38), 8, rue Buffon, F-75005 PARIS - France

Le déménagement des collections de paléontologie du Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN) répond à plusieurs enjeux fondamentaux. Le premier est la menace directe d'une crue centennale de la Seine qui engloutirait 75 % de la collection. Le deuxième est la réunion de toutes les collections de paléontologie dans un même lieu à l'horizon 2021. Cet enjeu est de taille puisqu'il s'agit d'organiser les fossiles de façon rationnelle et pérenne pour les générations à venir. Il permettra de disposer, à l'avenir, d'un outil performant répondant aux demandes des chercheurs français et internationaux mais aussi aux sollicitations des décideurs et aux appels d'offres : directions, ministères, programmes nationaux et internationaux. Le troisième enjeu est la possibilité de permettre au MNHN d'engager une rénovation des galeries d'anatomie comparée et de paléontologie. En préparation depuis de nombreuses années (conservation préventive, tri des collections et cartographie) et initié en interne par le déménagement de la collection d'Orbigny en juin 2019, le transfert des collections de paléontologie – phase 1 a officiellement débuté en août 2019. Trois secteurs ont été déménagés : invertébrés fossiles, micropaléontologie, poissons fossiles. Les chiffres confirment le caractère pharaonique de cette opération : 4 à 5 millions de spécimens, 15 000 bacs norme Europe, 50 m linéaires de spécimens hors-normes, installation d'une nouvelle typothèque des invertébrés fossiles (45 000 échantillons – 120 meubles), installation d'une nouvelle salle de micropaléontologie (100 m²). Au préalable, durant le premier semestre 2019, 4 salles du bâtiment cible ont été équipées de système d'armoires mobiles et une salle de 100 m² a été équipée de rayonnages fixes semi-lourds pour les hors-normes de la phase 2. Cette phase 2 a concerné les collections de mammifères fossiles (500 000 échantillons) et de reptiles, amphibiens et oiseaux fossiles. Elle s'est déroulée entre l'hiver 2020 et l'été 2021 et a abouti au déplacement de 2 millions de fossiles et de 390 m linéaires de spécimens hors-normes.

Mots-Clés : Collections ; Paléontologie ; déménagement ; transfert ; MNHN ; fossiles ; microfossiles



Marine sediments in the micropaleontology collections of the Muséum national d'Histoire naturelle: overview and potentials

Marie-Béatrice Forel

CR2P - Centre de Recherche en Paléontologie - Paris, MNHN- Sorbonne Université-CNRS – France

The Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN) of Paris, France, houses collections of major importance in the history of paleontology and particularly of micropaleontology. The contributors of these collections are diverse, from MNHN researchers to institutions as the French Oil Institute, scientists and explorers as Jean-Baptiste Charcot, Jacques-Yves Cousteau. They gather major historical collections such as the foraminifera's of Alcide d'Orbigny, bought by the MNHN in 1858, which led the groundwork for micropaleontology and biostratigraphy. Others paved the way to modern micropaleontology such as George Deflandre's collection, who pioneered in the fields of algology, protistology and paleoprotistology, or Nicolas Grekoff's material, which is a key contribution to modern ostracodology.

Besides these central collections, the MNHN also stores numerous modern marine sediments that are still not documented. Following the recent demonstration on material collected during the HMS *Challenger* voyage around the globe from 1872 to 1876, the sea-bottom sediments stored in the MNHN might provide snapshots to describe the changes related to anthropic influence through time and space. The MNHN preserves material collected by the *Travailleur* and *Talisman* cruises from 1880 to 1882, *Pourquoi-Pas?* in Rockall and Jan Mayen in 1921, *Lapérouse*, *Astrolabe* and *Octant* along Indochina shores in 1926, *La Calypso* voyage in the Red Sea in 1952, to cite only a few of them. A large project of documentation of these important collections has begun and here I propose an overview of the sea-bottom sediments stored in the micropaleontology collections of the MNHN and their potentials for ostracodologists.

Mots-Clés : Micropaleontology collections, Muséum national d'Histoire naturelle, marine sediments.



Pérennité et propriété des collections numériques de paléontologie de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique

Annelise Folie ^{*1}

1. Service Scientifique du Patrimoine, Institut royal des Sciences naturelles de Belgique.

Depuis près de 10 ans, l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique (IRSNB) s'équipe d'outils divers et variés pour numériser et valoriser ses 38 millions de spécimens : système de photostaking, microscope électronique à balayage, photogrammétrie en lumière structurée, micro- et nano-CT scanners et plus récemment scanner surfacique mobile. En Paléontologie, troisième plus grande collection sur les six que compte l'IRSNB, la priorité est pour l'instant donnée aux spécimens dits "Types et Figurés". Avec plus de 40.000 spécimens types et figurés sur plus de 3 millions dans les collections générales, il y a déjà du pain sur la planche. Dans ce cadre, la plateforme numérique maison « Open Source » nommée Virtual Collections « virtualcollections.naturalsciences.be » permet l'accès aux images et aux modèles tridimensionnels de ces spécimens de référence.

C'est alors que se posent les questions de la pérennité et de la propriété des images. Les images réalisées à l'IRSNB ne posent pas de problèmes car elles sont protégées par une licence CC BY NC ND et sont conservées sur une plateforme de la Politique scientifique fédérale (BELSPO = ministère belge des affaires scientifiques) afin de pérenniser l'accès aux collections numériques. En revanche, qu'en est-il des images réalisées par d'autres institutions et déposées sur des plateformes externes telles que Morphosource, Digimorph, MorphoMuseum, pour ne citer que les plus connues? Ces images et modèles des spécimens de l'IRSNB sont-ils également protégés, notamment contre des pratiques commerciales et qui sont les réels détenteurs des droits à l'image? Nous décrivons ici les divers cas de figures et tentons de répondre à ces questions qui taraudent de plus en plus les grands musées de histoires naturelles.

Mots-Clés : Numérisation, Pérennité, Propriété





La collection de géologie structurale de l'Université de Montpellier : recensement et mise en valeur via le service universitaire du patrimoine historique

Fanny Garel^{1,2*}, Audrey Théron³, Anne Delplanque¹, Franck Perdieu², Maurice Brunel⁴, Jean-Pierre Petit⁴, Emilien Oliot^{1,2}, Grégory Ballas^{1,2}, Roger Soliva^{1,2}

1 Géosciences Montpellier, Université de Montpellier & CNRS, Montpellier

2 Département Terre-Eau-Environnement, Faculté des Sciences, Université de Montpellier
3 Service du Patrimoine Historique de l'Université de Montpellier, Montpellier

4 Professeur émérite de l'Université de Montpellier

Le devenir des objets de la recherche en géologie (échantillons, cartes, carnets de terrain) est un enjeu patrimonial, mais ne bénéficie pas toujours de moyens dédiés en temps et en personnels. La collection du département d'enseignement Terre-Eau-Environnement de la Faculté des Sciences de l'Université de Montpellier comprend de nombreux échantillons exceptionnels : minéraux, roches magmatiques, sédimentaires et métamorphiques, mais aussi tectonites. Pour ces dernières, une grande partie des échantillons déformés dans le domaine ductile provient des recherches et missions de terrain menées par Maurice Mattauer, qui fut enseignant-chercheur à l'Université de Montpellier, et par ses étudiants et collaborateurs (Maurice Brunel, Pierre Choukroune, François Arthaud, Philippe Matte, etc.).

Une donation récente des enfants Mattauer à l'Université de Montpellier est venu enrichir la collection de plusieurs dizaines d'échantillons provenant de la collection personnelle de M. Mattauer (décédé en 2009).

En y ajoutant les tectonites cassantes, souvent prélevées sur de superbes affleurements régionaux, la collection comprend près de 600 échantillons que nous avons commencé à recenser et photographier, avec l'aide d'enseignants-chercheurs à la retraite. Nous souhaitons à long terme pouvoir valoriser cette collection, comprenant des échantillons exceptionnels, auprès des étudiants et du grand public. Parmi les pistes de valorisation, nous pouvons citer

(i) la mise en ligne des photographies sur le site internet du service du patrimoine historique de l'Université de Montpellier, site qui recense déjà nombre de collections naturalistes (minéralogie, paléontologie), (ii) le développement de supports cartographiques numériques détaillant la provenance des échantillons, (iii) l'exploitation des photographies visant à détailler le type de déformation et/ou les contraintes mécaniques subies par un échantillon, sur le modèle de la structurothèque de l'Université Paris-Sud.

Mots-Clés : lithothèque, structurothèque, tectonites, déformation cassante, déformation ductile



Les collections scientifiques (patrimoine géologique *ex situ*) de Bretagne.

Gendry Damien¹, Vidal Muriel²

¹ Géosciences Rennes - Université Rennes 1 / SGMB – France

² Géosciences Océan - Université de Bretagne Occidentale - France

L'inventaire régional du patrimoine géologique en Bretagne a permis d'identifier les principaux centres de conservation de collections géologiques. Contrairement à d'autres régions de France, la Bretagne ne possède actuellement pas de muséum d'histoire naturelle, le muséum de Rennes ayant fermé ses portes en 1944. Les universités de Rennes et Brest conservent ainsi le plus grand nombre de spécimens avec près d'un million d'items dans les principales disciplines de la géologie (minéralogie, pétrographie, paléontologie), sans oublier les forages, les archives ou encore les bibliothèques. Elles servent à la fois à l'enseignement et à la recherche, et contiennent de très nombreux spécimens de références (environ 15 000 types et figurés). Les collections liées aux sociétés savantes ou ecclésiastes explorateurs conservent localement, dans presque chaque département, des spécimens intéressants (Musées de Vannes et Dinan, musée des Frères de Ploërmel) scientifiquement ou pour la valorisation de la géologie auprès du grand public et des scolaires. Cet aspect est particulièrement bien développé à la Maison des minéraux de Crozon (fonds Le Bail et Chauris) avec les balades géologiques organisées dans la réserve naturelle régionale de la presqu'île de Crozon (RNR) qui compte pas moins de 27 géotopes crozonnais. L'inventaire se poursuit avec le repérage des collections historiques dans les lycées et les musées d'art ou d'histoire où ces collections peuvent être remises à l'écart et donc méconnues.

Mots-Clés : patrimoine géologique, collection géologique, Bretagne



<https://web.collections.osug.fr> : Un export de la base de données des collections de l'OSUG

Raphaël Jacquot^{*1}, Bernard Bouterin¹, Fabienne Giraud², Emilie Janots²,
ArnaudPêcher

¹ OSUG- Université Grenoble Alpes – France

² ISTerre - Université Grenoble Alpes – France

L'OSUG abrite d'importantes collections patrimoniales de minéraux (>5000 pièces), pour une large part récoltés dans les Alpes ; de fossiles (>200000 pièces), avec en particulier une collection de référence pour les ammonites du Crétacé inférieur ; de roches (>10000 pièces) récoltées partout dans le monde par les générations successives de chercheurs et doctorants. Lors du déménagement définitif de l'Institut Dolomieu vers le campus universitaire en 2012, un tri a dû être fait. Ont été gardées dans leurs intégralités les collections de paléontologie et de minéralogie, pour leur valeur patrimoniale et scientifique inestimable. Parmi les collections de roches, les échantillons en provenance de l'Himalaya (env. 6000 éch), reflétant l'une des activités recherche importante de la communauté grenobloise et provenant de zones difficiles d'accès, voir interdites maintenant, ont été privilégiés. Après 2 ans de stockage en container, ces collections ont été regroupées en 2016 dans des compactus, avec le souhait de les valoriser comme outil de recherche mis à la disposition de la communauté scientifique. Pour cela, l'enregistrement dans une base de données accessible via le WEB était indispensable. Dans un premier temps, la base utilisée a été SNBase, initiée par E. Robert pour la paléontologie ; elle a été implémentée par la saisie de nouvelles notices grâce à des emplois étudiants. Cela représente 10% de la collection totale. Cette base s'est révélée mal adaptée, spécialement pour l'export des notices vers le web. Avec le service informatique de l'OSUG, il a donc été décidé de la faire migrer vers une nouvelle base, hébergée à l'OSUG (base postGres). Cela présente de nombreux avantages, parmi lesquels : un meilleur contrôle du contenu de la base, de la définition et de la hiérarchisation des champs de données ; le choix de l'interface tant pour les requêtes que pour les réponses s'adaptant aux type d'échantillon (fossile, minéral, roche), et pouvant facilement évoluer ; des liens faciles vers les documents annexes ou vers une exploitation cartographique. Cette nouvelle application web est ouvertement accessible et pourra être facilement étendue pour gérer des collections autres que celles de l'OSUG, créer des liaisons vers d'autres catalogues existants ou vers des données actuellement stockées dans d'autres systèmes.



La collection de Gustav Steinmann, une fenêtre sud-américaine à l'Université de Strasbourg

Kévin Janneau ^{*1}

¹ Jardin des sciences de l'Université de Strasbourg

La médaille Gustav Steinmann, célèbre géologue et paléontologue allemand connu pour ses travaux sur les orogénèses alpine et andine ou sur la théorie de l'évolution, constitue la plus haute distinction délivrée chaque année par la *Deutsche Geologische Gesellschaft* (la Société Allemande de Géologie).

Gustav Steinmann (1856 – 1929) intègre l'Université de Strasbourg en 1877, en qualité d'Assistant à l'Institut de Paléontologie. Il participe alors à l'édition de cartes géologiques locales, notamment en Moselle, et obtient son habilitation de Maître de conférence en 1880. Par un heureux concours de circonstances, il embarque en 1882 au sein d'une expédition allemande à destination de Punta Arenas, au Chili, en vue de l'observation du Transit de Vénus en décembre 1882.

Il profite alors de l'occasion pour étudier la géologie sud-américaine entre 1883 et 1884 et y retournera régulièrement jusqu'en 1906.

Les collectes de fossiles effectuées durant ses séjours dans les Andes permettent d'enrichir les collections de l'Université de Strasbourg en particulier, puis celles d'autres universités allemandes suite à son départ de Strasbourg quelques années plus tard.

Ce matériel, décrit par G. Steinmann ou ses étudiants dans une série de monographies dédiées, constitue toujours de nos jours du matériel de référence en paléontologie. Parfois usé par le temps ou bien considéré perdu par le passé, ce matériel collecté à la fin du XIX^{ème} siècle a été redécouvert dans certains tiroirs poussiéreux des collections de paléontologie de l'Université de Strasbourg ces dernières années.

C'est grâce à une étude récente en Argentine que cette collection a pu être remise en lumière. Elle retrouve ainsi un statut de collection de référence auprès, notamment, des paléontologues sud-américains.

Mots-Clés : Type et figurés ; Steinmann ; Chili ; Strasbourg



Collections géosciences : concilier la conservation des collections et la recherche au sein d’une université.

Stéphane Jouve *

¹ Pôle Patrimoine – Bibliothèque de Sorbonne Université, Paris – France

Les collections de Sorbonne Université sont très variées : anatomie-pathologie, zoologie, paléontologie, métallogénie, pédagogies, instrumentation, art.... Une partie de ces collections, en particulier celles de géosciences, est gérée par un service dédié de la bibliothèque universitaire, le Pôle Patrimoine. La création de ce service a permis la professionnalisation de la gestion et conservation de ces collections, et leur assure ainsi un statut et une protection dans un contexte universitaire où leur pérennité est parfois délicate. Néanmoins, le non rattachement de ce service à un laboratoire rend plus difficile ses liens avec la recherche et les nouvelles entrées en collections. Les chercheurs sont réticents à confier la gestion des collections qu’ils constituent à un service extérieur au laboratoire, le personnel étant perçu avant tout comme constitué de conservateurs de musée, avec la crainte de l’inaccessibilité des échantillons confiés.

Le Pôle Patrimoine développe un projet de mise en ligne des collections ayant pour ambition de fédérer l’ensemble des collections de l’université, gérées directement ou non par le Pôle. La solution retenue repose sur un système de gestion de base de données de collections dédié habituellement aux institutions patrimoniales comme les grands musées pluridisciplinaires. Elle répond parfaitement aux besoins de conservation et de gestion de collections de typologies variées, mais n’est pas forcément prévu pour gérer les collections de recherche.

La constitution d’une carothèque océanique par l’un des laboratoires de l’université est l’occasion d’adapter la base de données outil à la gestion d’une collection très particulière et avant tout destinée à la recherche. Le projet a pour ambition de joindre les impératifs de conservation et de gestion des collections à ceux de la recherche, et constitue une première étape dans l’intégration de la gestion de collections de recherche pures. L’objectif est de pouvoir étendre par la suite la solution aux autres collections de recherche en géoscience. Cette base de données permettra de lier les échantillons aux résultats de recherche afférents au fur et à mesure de leur publication. La dernière étape sera le lien avec l’ensemble des données (analyses...) dans une seule et unique base, l’ensemble accessible via un portail unique.

Mots-Clés : Base de données ; conservation ; carothèque ; données de la recherche.



Apports des collections anciennes à l'actualisation des datations. Le cas du Miocène supérieur marin de la région lyonnaise

Amir Kalifi¹⁻²; Bastien Huet¹; Jean Loup Rubino¹; Bernard Pittet², Philippe Sorrel²,
Philippe-Hervé Leloup², Galy Albert³

¹ TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Féger (CSTJF) – TOTAL – France2 Univ Lyon, Univ Lyon1, ENSL, CNRS, LGL-TPE, 69622 Villeurbanne, France

³ CRPG, 15 rue Notre Dames des Pauvres, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France.

Que ce soit en raison de l'urbanisation, de la végétalisation, de la privatisation, de la sécurité ou des travaux temporaires de génie civil, de nombreux gisements de fossiles anciens ou des coupes géologiques n'existent plus ou sont devenues totalement inaccessibles, notamment en milieu urbain ou péri-urbain. Comme, par ailleurs, nombre d'attributions spécifiques ont évolué (quelque soit les types d'organismes fossiles) et que les échelles stratigraphiques ont été révisées depuis, l'utilisation du matériel préservé dans les collections est aujourd'hui cruciale dans le cadre d'études pluri-disciplinaires; à ce titre, les collections de l'Université de Lyon sont de notoriété mondiale.

Dans le cadre d'un travail de thèse récent, il a été possible de ré-étudier le Miocène marin de Lyon *intra-muros* (et ces environs) et procéder à des datations aux isotopes du Strontium sur des coquilles marines souvent difficilement déterminables, ou à intérêt stratigraphique limité. Nous avons ainsi pu obtenir de nouveaux âges Strontium, qui ont été ensuite calibrés sur les coupes sédimentologiques historiques de Lyon: le funiculaire de Croix-Paquet, le Jardin des Plantes, la Gare Saint-Paul, ou encore celle des Balmes de Saint Fons. Celles-ci ont toutes été décrites ou maintes fois revisitées par Fontannes, Depéret, ou Roman à la fin du XIX^{ème} siècle et au cours du XX^{ème} siècle, pour ne citer que les plus illustres auteurs.

Ceci conduit à mettre en évidence la présence de 2 séquences de dépôt marines au cours du Miocène supérieur autour de Lyon (correspondant en partie à l'ex-Vindobonien de la littérature):

- La séquence « S6 » d'âge Serravalien supérieur (12–10.8 Ma) : cette séquence inclut notamment les sables de Saint Fons, confirmant l'âge serravalien anciennement attribué et basé sur l'occurrence d'un foraminifère planctonique (*G. Menardii*, Latreille, 1969). Les sables de St-Fons seraient ainsi synchrones de la base de la coupe de Croix-Paquet et à des séries voisines retrouvées à des altitudes similaires. Ceci montre donc que les séries sont à pendage sub-horizontaux, et sont en onlap contre le socle vers l'Ouest;
- La séquence « S7 » d'âge Tortonien inférieur (10.8–9.5 Ma) : une bonne cohérence des âges est obtenue entre 172 et 200 m.a.s.l. Toutefois la faible épaisseur des dépôts entre les séquences S6 et S7 suggère l'existence d'une limite de séquence érosive entre ces deux séquences. Cette surface est matérialisée par le conglomérat de transgression décrite dans la littérature dans laquelle des coquilles ont été échantillonnées afin de dater l'âge de la transgression de S7. Ceci est compatible avec les âges disponibles dans la Bresse, au front du Jura, où la localité de Jujurieux révèle un âge Tortonien (10.4 +/- 0.65 ; 10.9 +/- 0.7 Ma), suggérant ainsi la présence d'un Tortonien non basal, plus jeune qu'en Provence.

Cette révision chronostratigraphique, sans être fondamentalement différente des attributions traditionnelles, ajoute cependant de la cohérence dans le canevas stratigraphique local en s'affranchissant des marqueurs stratigraphiques traditionnels dont la valeur était discutée, mais qui n'a jamais été formellement remise en question faute d'apports nouveaux. Cette étude démontre la valeur et l'importance des collections paléontologiques, à l'heure où l'accès aux sites /affleurements historiques devient de plus en plus difficile pour des raisons d'accessibilité, de sécurité ou de confidentialité.



Une typothèque à Besançon

Apolline Lefort^{*1}

¹ Muséum d'histoire naturelle de Besançon

L'exercice de résumer l'histoire et l'état des lieux des connaissances concernant les collections de géologie du Muséum de Besançon est périlleux. Majoritairement composées des spécimens paléontologiques issus des collections de l'Université de Franche-Comté, les importants déménagements durant ces deux derniers siècles ont mis à mal la cohérence de la collection. S'inscrivant dans un double mouvement de prise de conscience patrimoniale à la suite de l'incendie de Notre-Dame de Paris et d'un intérêt grandissant de la collectivité pour les sciences naturelles, la réappropriation des collections paléontologiques passe notamment par la rédaction de notre plan de sauvegarde des œuvres. Le Muséum d'histoire naturelle de Besançon est un établissement atypique logé dans une Citadelle Vauban inscrite au Patrimoine mondial de l'UNESCO et avoisinant d'autres établissements culturels. En d'autres termes, un lieu non prévu pour y conserver des collections ni en avoir un accès facilité...

Ces 18 derniers mois, nous avons tenté de mettre à l'abri les pièces importantes d'un point de vue scientifique, historique et patrimonial et ainsi entrepris la constitution d'une typothèque de paléontologie. Un grand réaménagement des tiroirs fut nécessaire pour retrouver une logique stratigraphique (et systématique) et permettre la recherche d'échantillons plus aisément. Ces mouvements concernent 340 000 spécimens répartis dans 3 réserves relativement éloignées les unes des autres et parfois dans des conditions de travail plutôt précaires. Plusieurs centaines de figurés et cités ont été localisés, et plus de 200 types ont été extraits, documentés, numérisés, marqués, reconditionnés et inventoriés.

Des recherches historiques sur l'origine des collections et le musée sont menées en parallèle. La dispersion de certains fonds à travers la Franche-Comté est également prise en compte pour faire un état des lieux des collections d'histoire naturelle dans les musées de la région.

Un nouveau chapitre s'ouvre dans l'histoire des collections naturalistes de Besançon, au cœur de l'arc jurassien et détenteur de collections clefs pour les échelles biostratigraphique et chronostratigraphique du Jurassique.

Mots-Clés : Muséum, histoire naturelle, Besançon, paléontologie, typothèque

^{*}Intervenant



De l'apport de la pédagogie numérique en Sciences de la Terre par numérisation d'objet en 3D et mise en place de la collection numérique collaborative de la SGF

Baptiste Suchéras-Marx^{*1, 2}, Jules Fleury¹, Consortium collection d'objets 3D SGF

¹ Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, Coll France, CEREGE UM34, Aix-en-Provence, France

² responsable éditorial sciences de la Terre, [Unisciel](https://unisciel.fr)

Les Sciences de la Terre, discipline scientifique naturaliste, sont basées sur l'observation. L'enseignement des Sciences de la Terre se traduit donc par une pratique importante de l'étude de nombreux objets géologiques que sont les roches, fossiles et minéraux. Malheureusement, le temps dédié à l'observation est souvent trop restreint et ne permet pas aux étudiants d'être formés ou de s'auto-former sur une collection exhaustive. La pédagogie par le numérique est une alternative prometteuse qui limite cette restriction temporelle et permet le travail d'observation en autonomie sur des objets géologiques. Depuis plusieurs années, un peu partout dans le monde, de vastes efforts de numérisation 3D de la surface et/ou de la structure interne d'objets géologiques ont été réalisés par diverses technologies (photogrammétrie, laser, projection de franges de lumière, ou tomographie par rayon X). Aujourd'hui, un grand nombre d'universités proposent des échantillons en support numérique. La création d'un compte sur la plateforme de visualisation 3D *Sketchfab* pour [l'université d'Aix-Marseille](https://univ-aix-marseille.fr) a permis de constituer une collection de fossiles annotés en ligne. Des leçons pédagogiques ont également été créées dans *moodle*. Les étudiants apprécient l'accès aux ressources numériques, échantillons annotés, et leçons. En revanche le temps qu'ils dédient à l'observation reste bien inférieur à celui mobilisé pour la numérisation. Aussi, afin de mutualiser les efforts de numérisation réalisés partout dans le monde francophone, la [SGF](https://sgf.fr) a créé un compte *Sketchfab*, donnant accès libre à l'ensemble des contributions des membres du consortium. Le choix de la plate-forme *Sketchfab* repose sur la possibilité d'intégrer les modèles dans les plates-formes de pédagogie numérique *moodle* et *claroline*. Cette initiative collaborative a pour objectif d'offrir à l'ensemble des enseignants une collection libre d'accès, exhaustive et référencée. Dans le futur, une collaboration avec [Unisciel](https://unisciel.fr) pourrait permettre d'élargir la ressource *moodle* type vers des travaux pratiques en ligne au travers de [Socles3](https://socles3.fr).

Mots-Clés : 3D, pédagogie numérique, fossiles, roches, moodle, sketchfab, accès ouvert, collaboratif, SGF





La collection de Géologie Générale du MNHN, Contenu et enjeux de l'informatisation des catalogues historiques

Pierre Sansjofre^{*1} et Caroline Noyes²

- 1) Muséum National d'Histoire Naturelle, DGDC, UGC-Géologie, IMPMC, CNRS UMR 7590 Paris, France
- 2) Muséum National d'Histoire Naturelle, DGDC, UGC-Géologie Paris, France

La collection de Géologie Générale du Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) est l'une des plus anciennes d'Europe. Du premier don de Pierre Poivre en 1757 jusqu'à la constitution en cours d'une nouvelle collection de microbialites, ce fonds compte désormais près d'un million de spécimens. Conservés dans 9 réserves, réparties dans 3 bâtiments, seulement 10 à 15 % ont fait l'objet d'un reconditionnement et inventaire informatique. La collection de Géologie Générale contient notamment les échantillons ramenés de grandes explorations comme les expéditions en Antarctique de Jules Dumont D'Urville en 1838, puis de Shackleton-Rowett en 1921, les expéditions de Jean-Baptiste Charcot en Arctique et au Groenland ou encore les voyages du père Teilhard de Chardin en Chine. Les collections scientifiques du Muséum sont les témoins historiques et patrimoniaux de ces grandes expéditions à l'image de l'échantillon du 9^{ème} étage de la tour de porcelaine de Nankin ramené par Augustin Leclancher en 1844 juste avant sa complète destruction.

Jusqu'en 1961, chaque acquisition au sein de la collection de roches du MNHN a été rigoureusement référencée par écrit dans 72 registres regroupés sous forme de catalogues historiques. C'est ainsi que plus de 3000 catalogues historiques, comprenant plus de 30 000 pages ont été produites. Ces catalogues représentent une véritable carte de lecture des acquisitions du MNHN et sont un outil indispensable pour identifier les nombreux spécimens rangés dans les réserves situées sous la Galerie de Géologie. Dans l'idée d'informatiser ces catalogues historiques et afin de rendre leur contenu accessible au plus grand nombre, nous proposons un projet de science participative. Celui-ci vous plongera dans plus de 200 ans d'histoire du Muséum National d'Histoire Naturelle afin de décrypter les mystères perdus de certains échantillons.

Dans cet exposé, après vous avoir présenté la collection de Géologie Générale du MNHN et un projet de valorisation via de l'imagerie 3D de certains spécimens, je vous présenterai le défi auquel nous sommes confrontés pour établir un inventaire complet et une informatisation des catalogues historiques.

^{*}Intervenant



T16.3 Les outils de la protection, de la vulgarisation et du géotourisme



Géodiversité en France : un nouveau magazine en ligne de diffusion des Sciences de la Terre pour tous les publics

Jacques Avoine ^{*1}, Laura Baillet ¹, François Baudin ²

¹ Association Patrimoine Géologique de Normandie (APGN) – France

² Société géologique de France (SGF) – France

La section Géole de la Société Géologique de France (SGF) a pris l'initiative de créer un nouveau webzine, *Géodiversité en France*, consacré à la diffusion des Sciences de la Terre. La Réunion des Sciences de la Terre de Lyon est l'occasion de présenter le premier numéro de ce magazine. C'est une revue semestrielle destinée à tous les publics, de l'amateur de géologie aux professionnels de la discipline. Il est accessible gratuitement en téléchargement sur le site internet de la SGF.

Géodiversité en France publie des articles sur tout sujet relatif aux activités et outils pédagogiques relatifs aux Sciences de la Terre, et à la connaissance, la protection, la valorisation et la conservation du patrimoine géologique en France. Les propositions d'articles sur certains aspects comme la description de sites ou de collections géologiques sont également les bienvenues, dans la mesure où elles font référence à des problématiques de conservation ou de mise en valeur. Le magazine peut également contenir des informations brèves sur des événements, des actualités, des publications d'ouvrages, etc.

Toutes les contributions seront approuvées au préalable par le comité éditorial du magazine, en cours de constitution, selon des critères plus souples que ceux des revues scientifiques. Le respect des instructions aux auteurs, disponibles sur le site de la SGF, garantit une évaluation plus efficace et une meilleure préparation des textes.

Regroupant une diversité d'acteurs des Sciences de la Terre, la section Géole de la SGF est née avec l'envie d'améliorer la diffusion des connaissances géologiques, en échangeant sur les outils les plus appropriés. Elle organise des rencontres annuelles qui sont l'occasion d'aborder, en salle et sur le terrain, les méthodes et pratiques de diffusion de la connaissance géologique adaptées à différents publics. Le magazine *Géodiversité en France* a le même objectif que ces rencontres mais il va permettre de garder une trace écrite de ces échanges et surtout de partager les expériences avec le plus grand nombre.

Mots-Clés : magazine, géodiversité, patrimoine géologique, connaissance, protection, valorisation



Les sentiers karstiques : un outil de découverte du patrimoine géologique mis en pratique par les Causses du Quercy

Vincent Biot ^{* 1, 2}, Thierry Pélissié ^{1,2,3}

¹ Parc naturel régional Géoparc mondial UNESCO des Causses du Quercy - France

² Fédération française de spéléologie - France

³ Réserve naturelle national d'intérêt géologique du Lot - France

Les sentiers karstiques sont des itinéraires pédestres proposant de parcourir des paysages karstiques et d'appréhender des formations géologiques spécifiques de ces environnements. Le premier sentier karstique a été créé dans le Doubs au début des années 1990.

A partir de 2005, le Comité de spéléologie régional de l'Occitanie (CSR O) a posé les bases d'une réflexion afin de créer un réseau régional de sentiers karstiques, avec pour objectif d'en créer un par département (initialement à l'échelle de la région Midi-Pyrénées puis élargie à l'Occitanie). Dans ce cadre, il réalise pour le compte de la Fédération française de spéléologie (FFS) un document intitulé « Création de sentiers en milieu karstique : défis, enjeux, réalisation ».

Le premier sentier sera achevé en 2014 en Haute-Garonne. Le dernier né a été élaboré dans le Lot en 2020 sur les Causses du Quercy, en collaboration avec la Réserve naturelle nationale géologique du Lot et le Parc naturel régional des Causses du Quercy qui est également labellisé Géoparc mondial Unesco. Dans ce cadre, une stratégie de valorisation des Géosites a été définie : le sentier de l'igüe de Crégols fait partie des lieux à fort intérêt géopatrimonial et géotouristique. Il a ainsi été retenu pour réaliser un sentier karstique accessible au grand public. Le pilotage a été partagé entre le Comité de spéléologie régional et les Causses du Quercy afin de mettre à profit du projet l'ingénierie, la connaissance du territoire et les compétences de chacun. Ce projet a été conduit dans un souci commun de faire découvrir et partager avec le plus grand nombre le patrimoine géologique des Causses du Quercy.

Fort de ces dynamiques, la FFS a créé en 2021 un label national "sentier karstique". Ce label se veut être un garant de la qualité de la réalisation du projet dans son ensemble et de l'information qui sera donnée, de la pérennité de l'entretien et de la gestion du sentier dans le temps. Par ce label, l'objectif est de proposer une offre de découverte du patrimoine karstique de qualité et reconnue.

Mots-Clés : sentier karstique, patrimoine, géoparc, réserve naturelle, valorisation, Causses du Quercy



GéolVal, un acteur de la valorisation du patrimoine géologique et du géotourisme en Pyrénées Atlantiques.

Audrey Billerot ¹ *, Annie Lacazedieu ¹, Bérénice Knecht ¹

¹ GéolVal - France

L'association GéolVal travaille à la valorisation du patrimoine géologique des Pyrénées-Atlantiques depuis sa création en 1997. Ses actions sont depuis toujours axées sur la vulgarisation de la géologie, comme en témoignent l'élaboration de la Route Géologique TransPyrénéenne en 2008. Cependant, depuis une dizaine d'années, une partie des activités de GéolVal se développe autour du géotourisme, en tant que forme de tourisme qui promeut le patrimoine géologique d'un territoire et vise au développement durable de celui-ci. Dans ce cadre, GéolVal a développé depuis 2011 un partenariat avec l'Office du Tourisme du Haut- Béarn et les accompagnateurs en montagne locaux en proposant durant l'été des randonnées destinées aux vacanciers et encadrées par un géologue qui interprète paysages et affleurements rencontrés sur l'itinéraire. Ce partenariat se poursuit et s'étoffe avec le début de l'exploitation du "GéoTrain Pyrénéen". Le "GéoTrain" est un produit de géotourisme dans lequel GéolVal propose une interprétation de la géologie en termes de patrimoine et d'interactions entre l'Homme et la nature, en s'appuyant sur les problèmes posés par la construction d'une ligne de chemin de fer de montagne, en l'occurrence la ligne Pau- Canfranc, partiellement réhabilitée et ré-ouverte aux voyageurs depuis 2016. L'idée est de proposer à chaque halte du train des informations sur la géologie de la vallée en relation avec les activités humaines qui s'y développent, ainsi que des circuits de randonnées comprenant des points d'intérêt géologiques et patrimoniaux. L'exploitation du "GéoTrain" implique un fort partenariat avec trois offices de tourisme, la SNCF, ainsi que des accompagnateurs en montagne, des étudiants en géosciences, des acteurs et élus du territoire. Ainsi, GéolVal s'inscrit concrètement dans une démarche de développement durable de la vallée d'Aspe, appuyée sur ces activités plus "traditionnelles" de vulgarisation.

Mots-Clés : Géotourisme, patrimoine géologique, développement durable

*Intervenant



Apport des sciences participatives dans la démarche de préservation des sols : le projet expérimental la 'Clé du Sol'

Manon Bouvard ^{*1}, Delphine Delaunay ¹

¹ Fondation de Coopération Scientifique Rovaltain - France

Les projets de sciences participatives bénéficiant de l'accompagnement de chercheurs issus du monde académique sont actuellement en pleine expansion, pourtant ceux relatifs aux sols et à leur santé restent encore anecdotiques alors que les sols constituent un enjeu de taille dans la lutte contre le réchauffement climatique. Le projet la Clé du Sol, qui cible les sols de jardins potagers, cherche donc à explorer ce champ d'action. Les participants, soutenus par un comité d'experts en sciences du sol, sont invités à sélectionner les indicateurs du sol qui leur semblent pertinents, sont formés au prélèvement d'échantillons avant d'être amenés à une réflexion sur la signification des résultats. Les livrables se présenteront sous la forme d'une charte commune de pratiques vertueuses.

Quel est l'impact réel de ces projets sur la santé du sol ? La dimension pratique et participative apporte-elle une plus-value significative sur les changements de comportement vis-à-vis de l'environnement (changement de pratiques au jardin, pro-activité dans la diffusion des connaissances acquises, engagement dans une action politique et/ou communautaire) ? Au cours de ce projet, accompagné de chercheurs en sciences sociales, nous mettrons en place un suivi des actions menées (réunions, formations, ateliers participatifs, etc.) en évaluant différents paramètres : présence lors des rencontres, réponses aux questionnaires, lecture des supports de compréhension, questions posées et prise de parole dans les temps d'échanges, etc. La pertinence de ces indicateurs est ré-évaluée en permanence et prend la forme d'un design itératif dans le but d'élaborer des méthodes d'analyse fiables pour rendre compte de l'impact sur l'amélioration de la qualité des sols et sur les participants.

Mots-Clés : Sols, Sciences participatives, Science sociale, Santé, Jardins



Utiliser l'intelligence artificielle et les sciences participatives pour vulgariser la géologie auprès du grand public : perspectives ouvertes par le projet RockNet

Antoine Bouziat ^{*1}, Sylvain Desroziers ¹, Mathieu Feraille ¹, Jean-Claude Lecomte ¹, Christophe Cornet ¹, François Cokelaer ¹, Renaud Divies ¹

¹ IFP Energies Nouvelles, Rueil-Malmaison, France

Vulgariser et diffuser un premier niveau de connaissance et de compréhension géologiques auprès du grand public est devenu un enjeu important de notre époque, autant dans une démarche de valorisation et protection du patrimoine naturel que d'implication croissante des citoyens dans les questions environnementales et énergétiques. Les technologies numériques émergentes et la digitalisation de nos sociétés élargissent la gamme d'outils à disposition pour répondre à ce besoin. Dans cette présentation, nous abordons en particulier les perspectives ouvertes par la combinaison de l'intelligence artificielle et des sciences participatives, en nous appuyant sur la naissance du projet RockNet™.

Inspiré par le succès du projet Pl@ntNet pour la vulgarisation des connaissances botaniques, le principe de RockNet™ est le développement d'une application pour smartphone permettant au grand public de photographier des échantillons rocheux et d'obtenir une reconnaissance de leur faciès lithologique par un algorithme d'intelligence artificielle. Une base de données d'images d'échantillons se constitue alors de manière partagée entre tous les utilisateurs, tandis que les plus experts d'entre eux peuvent amender les reconnaissances automatiques afin d'améliorer progressivement les capacités de l'algorithme. L'outil ainsi produit collectivement devient ensuite un support possible pour la vulgarisation géoscientifique, en se basant sur la curiosité des citoyens pour leur environnement géologique immédiat.

Un premier prototype d'application, capable de reconnaître 12 familles d'échantillons, a déjà été développé et entraîné sur quelques milliers de photos. A partir de cette expérience concrète, nous illustrons à la fois le potentiel de ce type d'outil pour la médiation géologique et les défis techniques à considérer avant une diffusion à grande échelle.

Mots-Clés : Vulgarisation, Intelligence artificielle, Sciences participatives



Une tentative de préservation des blocs erratiques de la vallée de l'Arve: l'inventaire d'Alphonse Favre de 1868

Michel Cara¹*, Sylvain Coutterand²

¹ Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) – CNRS : UMR7516, Université de Strasbourg, France

² Environnements Dynamiques et Territoire de Montagne (EDYTEM) – CNRS : UMR5204, Université SavoieMont Blanc, France

Constatant l'exploitation intensive des blocs erratiques jonchant la vallée de l'Arve, Alphonse Favre, professeur en géologie de l'université de Genève, établit un inventaire de 149 blocs qu'il jugeait devoir être préservés comme témoins des avancées glaciaires successives du passé. Cet inventaire, commencé en 1867 et complété en 1868, a été adressé à la Société Géologique de France avec copie au préfet de Haute Savoie. Comme Favre l'écrivit peu après 1875 à propos de la législation française : « Nos peines ont été perdues, aucun règlement ou loi ne protège ces blocs ». Il a fallu attendre la loi du 26 avril 1906, puis celle du 4 septembre 1930, pour que la France puisse protéger ses « monuments naturels ».

La copie de l'inventaire Favre adressée au préfet est conservée aux archives départementales de Haute Savoie. Nous avons par ailleurs consulté les documents et cartes originaux qui en sont à l'origine à l'ETH de Zürich. Ces documents nous ont permis de localiser une partie des blocs de granite inventoriés par A. Favre dans la vallée de Chamonix. Il s'avère que la plupart de ceux-ci ont été partiellement exploités alors que d'autres ont disparus sous l'action des graniteurs qui œuvraient pour alimenter les chantiers de la vallée. C'est le cas du bloc n°1 situé au Montenvers qui a très probablement été utilisé pour la construction de l'hôtel ou des ouvrages du chemin de fer achevé en 1908, ou du bloc n°5 en rive droite de l'Arve à Chamonix qui a été détruit lors d'une opération immobilière des années 1970.

Lors de cette présentation nous montrons quelques uns des documents utilisés pour cette recherche et mettons en évidence l'ancienneté du souci de préserver certains témoins peu connus de notre passé géologique, bien avant que la loi française en permette la protection.

Mots-Clés : Blocs erratiques, Patrimoine glaciaire, Mont Blanc, Alphonse Favre



Le géotourisme dinosaurien : une offre mondialisée qui interroge la notion d'authenticité patrimoniale.

Nathalie Cayla

Université Savoie Mont-Blanc – UMR 5204 EDYTEM

L'essor actuel de l'offre géotouristique de découverte des sites paléontologiques à dinosaure illustre combien les géopatrimoines sont désormais reconnus et régulièrement convoqués dans l'élaboration de stratégies touristiques. Doublement contraints par la compression temporelle de la phase de patrimonialisation et la concurrence internationale entre destinations en recherche de singularisation, les aménageurs sont confrontés à un dilemme : comment développer une destination touristique attractive, répondant aux attentes du public, dans le respect de l'authenticité patrimoniale du géosite ?

Les valeurs scientifiques de ces géopatrimoines sont bien sûr primordiales et progressent avec les recherches conduites. Mais, dans le cas de certains sites connus de longue date, les valeurs additionnelles s'appuyant sur une riche mythologie régionale interrogent la question de l'inversion des valeurs lors de la mise en tourisme destinée à des non spécialistes. Entre besoin d'interprétation d'une découverte locale au sein d'une biodiversité passée plus globale, et attente des publics dont l'imaginaire sur cette thématique est largement forgée par des médias stéréotypés ou une culture de légendes, l'équilibre entre respect de l'authenticité, besoin d'interprétation et développement économique est parfois difficile à trouver.

Une typologie des destinations actuelles est proposée, à partir d'un panorama diachronique de l'expansion du géotourisme dinosaurien, montrant l'internationalisation progressive de l'offre. L'analyse de la place des valeurs scientifiques et additionnelles et de la notion d'authenticité est ensuite discutée au regard des mécanismes d'interprétations élaborés et de la perception de celle-ci par le visiteur. Enfin, un focus sur le Géoparc Mondial UNESCO Pays d'Hateg, dans les Carpathes roumaines illustre combien la part intangible du géopatrimoine peut faire l'objet d'une co-construction avec les habitants et les visiteurs, dans la perspective de développer une forte identité territoriale, avec cependant la menace d'attentes de plus en plus stéréotypées avec la progression de la fréquentation touristique.

Mots-Clés : Géotourisme, Dinosaures, Graphe de réseaux d'acteurs, géopatrimoines.

*Intervenant



Autour de la Montagne de Reims : la lente et difficile percée des thématiques géopatrimoniales et géotouristiques

Gilles Fronteau ^{*1}

1 : Université de Reims Champagne Ardenne – GEGENAA - France

La Montagne de Reims et ses environs, ce qui couvre une partie des Pays de Reims et d'Épernay, correspondent à un territoire de marge, aux limites de la plaine de la Champagne crayeuse et des plateaux incisés dans les couches cénozoïques du centre du Bassin parisien.

Dans les années 80, ce territoire était plutôt précurseur avec la mise en place d'un sentier géologique à Mailly-Champagne et des volontés pour protéger certains sites paléontologiques comme la falunière de Pourcy ou les gisements du Mont de Berru.

Mais peut être par manque de moyens, de suivi ou de volonté locales, ces initiatives n'ont pas réussi à se maintenir ou à se développer. Il faut dire que le contexte local est bien plus propice à d'autres formes de patrimoines et de mises en tourisme. Le secteur était essentiellement tourné vers l'oenotourisme autour du Champagne, le patrimoine culturel lié aux grands monuments (Cathédrale de Reims) et à la protection/valorisation d'importants site de patrimoine biologique : les faux de Verzy notamment. Alors que, par ailleurs, la géologie de cette « Montagne » correspond essentiellement à des formations meubles, fortement recouvertes par la végétation et donc peu lisibles, peu aisées à valoriser, etc.

Et ce n'est que très récemment que différentes opportunités ont permis un certain renouveau et surtout une mise en lumière de la composante géopatrimoniale locale. Non pas comme un thème essentiel ou principal, mais comme un élément intégré à des offres touristiques et culturelles revisitées multi-thématiques. Ainsi, le sentier géologique (PNR Montagne de Reims/Commune de Mailly-Champagne), initialement plutôt orienté vers les scolaires, est devenu un sentier pédagogique, une randonnée ouverte à tous. Le Musée du vin de Champagne et d'Archéologie régionale (Ville d'Épernay) vient de réouvrir ses portes en intégrant une salle dédiée à la géologie pour illustrer les terroirs de la Champagne viticole. Ou encore, la Cave aux coquillages à Fleury-la-Rivière, une initiative privée, qui en mêlant géologie et œnologie et en bénéficiant d'une mise en valeur de qualité, arrive à séduire un large public.

Désormais, alors que par ailleurs des outils de protection du géopatrimoine se mettent en place comme les Sablières de Châlons-sur-Vesle, classées RNR fin 2020, des projets d'APPG à venir ; l'idéal serait de bénéficier de ces points d'appui déjà existants pour renforcer l'offre ou mettre en œuvre de nouveaux projets. Et il est effectivement possible d'espérer que les quelques belles réussites que le territoire compte déjà, motiveront de nouvelles actions et d'y créer un véritable maillage géotouristique pérenne et structuré.

Mots-Clés : Géopatrimoine, Géotourisme, Reims, Épernay, PNR Montagne de Reims.



Les géo-maquettes : indémodables outils de visualisation des reliefs au service de la médiation des géosciences.

Fabien Hobléa^{*1}, Christophe Lansigu², Philippe Schoeneich³

¹EDYTEM - Université Savoie Mont Blanc - France

²Parc naturel régional / Géoparc mondial UNESCO du Massif des Bauges - France

³PACTE - Université Grenoble-Alpes - France

Les maquettes sont des modèles réduits permettant la représentation, la modélisation, l'exposition voire la manipulation de divers types d'objets de toutes tailles.

Les maquettes sont utilisées de longue date pour représenter des reliefs et des paysages géologiques. Elles ont notamment été utilisées au départ comme fond topographique support pour la reproduction de bâtiments militaires (plans-reliefs de Louis XIV...) ou pour des dioramas, avant d'être ciblées sur la reproduction fidèle de reliefs existants (notamment de montagnes) ou sur de la modélisation, souvent dynamique, de types de reliefs (karst, lits fluviaux...), avec une tendance récente à introduire des informations litho-stratigraphiques et structurales au moyen d'écorchés 3D.

Après avoir retracé l'histoire et l'évolution de ce qu'il est convenu d'appeler ici des « géo-maquettes », permettant l'établissement d'une typologie, sont examinées, au travers de quelques exemples et études critiques de cas variés, les conditions et objectifs de leurs réalisations et usages actuels dans le cadre de la médiation des géosciences et de la valorisation des géosites.

La question est ainsi posée de l'actualité et du devenir de cet outil, au regard du développement des outils de visualisation et de représentation numérique 3D, *a priori* concurrents de la maquette physique, mais pouvant devenir des alliés (recours au LIDAR, à l'impression 3D...).

Il en ressort que le monde des géo-maquettes est loin de l'extinction, mais en pleine mutation. Restant attaché à ses savoir-faire originels, il est cependant mis au défi des opportunités offertes par le développement des technologies 3D. Il est aussi confronté à des données géoscientifiques de plus en plus complexes, qu'il s'agit de retranscrire en miniature et de manière simplifiée dans le respect des règles et principes de l'interprétation et de la médiation. Ce qui représente en soi un challenge cognitif tout aussi important et passionnant que le défi de l'hybridation numérique.

Mots-Clés : maquette, relief, géologie, médiation, 3D



Évolution des outils de médiation dans les Sciences de la Terre et adaptations potentielles permanentes

Sophie C Justice ^{*1}

^{*1} Géoparc mondial UNESCO du Chablais, Syndicat Intercommunal d'Aménagement du Chablais

Le COVID-19 présente un challenge supplémentaire pour les instances et les médiateurs mandatés pour communiquer sur les Sciences de la Terre. Il pourrait entraîner de nouvelles innovations durables dans l'approche, la forme et le support choisi pour la médiation de la géologie. L'appréciation et le succès des outils du Géoparc du Chablais sera présenté avant et pendant la pandémie actuelle et une analyse des possibles évolutions durables des pratiques sera partagée.

Actuellement les patrimoines géologiques et la géodiversité sont peu remarqués par le public et les décideurs. Cela entraîne une faible appréciation de l'importance fondamentale de la géologie dans la compréhension, ainsi que la gestion des ressources durables, des risques naturels et l'importance des cycles naturels entres autres.

En contraste des musées et des lieux de visites à thème géologique qui visent un public motivé par la géologie, les Géoparcs mondial UNESCO « UGGp » sont au service de leurs territoires : les populations locales, les scolaires et les décideurs.

Étant un territoire labellisé « UGGp » depuis 2012, le Chablais a conçu des outils de médiation innovants qui sont en évolution permanente à destination de ce public qui, en grand partie, « ne cherche pas de la géologie ». Il œuvre non seulement pour informer la population locale des « géopatrimoines » ponctuels, mais aussi pour apporter une éducation de base dans les sciences de la Terre ; une boîte à outils, que le public peut emprunter inconsciemment dans sa vie quotidienne ainsi qu'en paysage inconnu.

Depuis mars 2020, un nouveau challenge a été engagé, la conception de nouveaux outils et le remaniement des supports de médiation existants qui se sont adaptés au confinement et au déconfinement pour ce laps de temps toujours indéfini. Un suivi de leurs impacts a été réalisé afin d'évaluer nos conceptions et d'informer de notre approche plus générale à long terme.

Mots-Clés : patrimoine géologique, géodiversité, médiation, adaptation, géoparc



Les paysages : le vecteur idéal pour enseigner la géologie au plus grand nombre

Jean-Jacques Jarrige*, Claude Bacchiana, Yves Hervouet

Cap Terre – Université de Bordeaux 33 615 Bordeaux cedex

Le paysage est l'environnement que chaque individu connaît bien, dans lequel il a ses repères quotidiens associés à ses activités privées ou professionnelles. L'analyse d'un paysage permet une approche pluridisciplinaire et multiscalaire prenant en compte la dimension temps essentielle en géologie. Cette approche est au programme des lycées. C'est donc le vecteur idéal pour présenter des concepts géologiques et démontrer la place importante des Sciences de la Terre dans notre environnement et nos activités, aux élèves et au grand public.

La géodiversité, qui caractérise les domaines continentaux, est à l'origine de la diversité des paysages observés. La nature géologique du sous-sol contrôle la morphologie de la surface terrestre, les caractéristiques des sols et donc les occupations végétales et humaines. Elle influence fortement les activités anthropiques, l'exploitation des ressources et les risques naturels auxquels les sociétés sont confrontées. La surface des continents est soumise à des processus d'érosion, de transport et de sédimentation qui modifient les paysages tant à l'échelle humaine qu'à l'échelle du temps géologique. Les connaissances que nous avons des processus de la géodynamique interne et externe de notre planète permettent de reconstituer les paysages anciens et de comprendre leurs évolutions jusqu'à nos jours.

Cap Terre met à la disposition du plus grand nombre des guides pour comprendre des paysages aquitains et ainsi évoquer des jalons de l'histoire géologique de la région et l'impact des géosciences dans notre environnement. Ces supports peuvent être utilisés par les enseignants pour mettre en place des sorties sur le terrain. Le soutien de la région Nouvelle Aquitaine permet de réaliser également une douzaine de vidéos sur des sites représentatifs du territoire. En complément Cap Terre proposera des sorties sur le terrain, destinées au grand public et aux scolaires.

Mots-Clés : géologie, paysages, enseignement, médiation



Méthodes et outils pour la révélation et la mise en valeur du géopatrimoine hérité de la débâcle de l'Oisans de 1219.

Camille L'Hutereau ^{*1}, Philippe Schoeneich ², Elise Beck ², Fabien Hobléa ³

¹ Institut d'Urbanisme et de Géographie Alpine – France

² PACTE – Université Grenoble Alpes – France

³ EDYTEM – Université Savoie-Mont-Blanc – France

La débâcle de l'Oisans est une catastrophe alpine datant de septembre 1219. A l'issue d'une réaction en chaîne, un lac de barrage gravitaire situé dans la plaine de Bourg d'Oisans se vidange, provoquant une inondation destructrice à Grenoble. Cette catastrophe marque profondément l'histoire hydrologique du Dauphiné. En 2019, à l'occasion du huit-centenaire de la débâcle, une ré-analyse géomorphologique a été entamée dans le but de recenser et interpréter les morphologies à l'aval immédiat de l'ancien lac. Une approche multi-outils (MNT HR, datations C14, etc.) a permis de réinterpréter la nature du barrage gravitaire, de révéler des morphologies typiques de débâcle et de préciser le scénario consensuel usuel de l'événement.

Ces résultats ont pu être en partie intégrés à la fiche descriptive du géosite de l'Inventaire National du Patrimoine Géologique, rebaptisée : « Ancien barrage naturel composite du Pont de la Vêna, origine de la débâcle de la Romanche de 1219 » pour sa validation nationale en 2020 (n° INPG RHA0133). Cette ré-analyse géomorphologique questionne la délimitation et la vulnérabilité du site, en appelant notamment à considérer les morphologies de débâcle reconnues en aval du site INPG comme partie intégrante de la valeur géopatrimoniale de la basse Romanche. La question de la pérennité et de la préservation de ces formes d'intérêt patrimonial est également posée dans un contexte de vallée fortement anthropisée. Cela passe par une prise de conscience des décideurs locaux, nécessitant une médiation pour qu'ils puissent s'approprier les constats de l'étude scientifique. La question de la protection passe aussi par un projet de valorisation des formes catastrophiques du couloir de Livet et de la Plaine de Bourg d'Oisans. Un tel projet, participant de la patrimonialisation du risque, relance la réflexion autour de la visibilité des formes et des contenus géodidactiques et géotouristiques, et sur les outils les plus appropriés à leur mise en scène.

Mots-Clés : Débâcle, terrasses de débâcle, géomorphologie, géopatrimoine, Oisans, catastrophe ancienne, ré-analyse, géosite, médiation.



Le géopatrimoine « Impact de Rochechouart » : Une richesse pour les territoires, pour la France et pour l'Humanité

Philippe Lambert ^{*1} et le CIRIR Consortium ²

¹ Centre International de Recherches et de Restitution sur les Impacts et sur Rochechouart (CIRIR)-Rochechouart – France. ² Voir liste des membres dans Lambert et al. 2020, *Géologues*, n° 205, p. 92-pp 23

Dans le panorama des rares analogues terrestres aux grands impacts observés sur les surfaces planétaires, celui de Rochechouart apparaît comme une richesse pour l'Humanité. Pourquoi ? De quoi s'agit-il ? En quoi se distingue-t-il ? Comment le valoriser et en quoi cela sert-il les territoires, la France mais également tous les géopatrimoines « Impacts » de la planète et la Science qui s'y rattache ? Comment la faire connaître et la faire partager par le plus grand nombre pour « élever le genre humain » en élevant sa culture scientifique, notamment celle qui touche la Terre, « *la seule maison que nous ayons* », et comment la communauté scientifique en général, celle des géologues en particulier, contribue-t-elle et peut-elle contribuer ? Nous tenterons d'éclairer ces questions en commençant par la dimension du phénomène. Contribuant directement à l'habitabilité des planètes, il semble désormais très probable qu'il ait pu jouer un rôle majeur dans leur fertilisation et dans « **les** » émergences de la Vie sur Terre et ailleurs dans le système solaire et au-delà. Notre Terre, très dynamique, n'a conservé qu'un très petit nombre de ses manifestations. Environ 200 cratères et structures d'impacts terrestres sont référencés officiellement à ce jour. Or ceux-ci constituent de loin, **le seul laboratoire naturel réellement accessible à l'homme pour étudier en détail le phénomène et ses incidences fondamentales**. Jusqu'à très récemment l'unique exemplaire connu en France comptait parmi les moins étudiés de la planète. Il se distingue cependant par la qualité et l'accessibilité du « gisement de savoirs » qu'il expose, ce que traduit la récente mobilisation de la communauté internationale à travers le CIRIR pour en faire l'étude. Au-delà de sa dimension scientifique, la « Mission de Service Public Planétaire » entreprise à Rochechouart par le CIRIR s'attache à sensibiliser l'Humanité à l'importance scientifique, culturelle, économique et philosophique du phénomène. Elle vise à accroître les efforts en faveur de sa connaissance et à attirer les jeunes dans la discipline en la faisant connaître et apprécier par le grand public, les pouvoirs publics, les décideurs et les responsables de l'enseignement et de la recherche en France et à l'étranger. Notre géopatrimoine est donc une richesse pour les territoires, pour la France et pour l'Humanité. C'est par ailleurs une « locomotive » que le CIRIR compte exploiter notamment avec le projet « CIRIR-Unesco » et par le biais de ses membres et leurs réseaux, pour faire connaître et reconnaître la géodiversité en France et dans le monde.

Remerciements : Merci à tous les membres du CIRIR pour leur confiance et leur soutien qu'il s'agisse des scientifiques répartis sur les cinq continents qui composent la branche « Recherche » du CIRIR, ou des personnalités, associations, organismes de sa branche « Restitution » qui, ensemble, contribuent au vaste programme de valorisation du géopatrimoine Rochechouart et impacts terrestres, qu'a entrepris le CIRIR auprès du grand public et des pouvoirs publics au niveau national et international. Merci en particulier aux collectivités locales (notamment la communauté de communes Porte Océane du Limousin) et à l'Etat pour le soutien matériel et financier apporté à l'installation et au fonctionnement des infrastructures du CIRIR sur le géosite lui-même.

Mots-Clés : Géopatrimoine, Impact de Rochechouart, Géodiversité, Restitution au Public, Patrimoine de l'Humanité, Emergence de la Vie



Vigie-Terre, un nouveau programme de sciences participatives au service de la géologie et de la géodiversité

Asma Seinhausser ⁽¹⁾, Grégoire Egoroff ⁽²⁾, Alicia Mansilla-Sanchez ⁽³⁾, Lydia Detienne ⁽³⁾, Patrick De Wever ⁽¹⁾ et Isabelle Rouget ⁽¹⁾

(1) Muséum national d'Histoire naturelle, UMR 7207 Centre de Recherche en Paléontologie - Paris
Géologie, 43 rue Buffon, 75005 Paris

asma.steinhausser@mnhn.fr, isabelle.rouget@mnhn.fr

(2) Muséum national d'Histoire naturelle, UMS Patrinat – Paris, Géologie, 43 rue Buffon, 75005 Paris
gregoire.egoroff@mnhn.fr

(3) Muséum national d'Histoire naturelle, UMS MoSaic - Méthodes et outils pour les sciences participatives

« les sciences participatives sont définies comme les formes de production de connaissances scientifiques auxquelles des acteurs non-scientifiques-professionnels, qu'il s'agisse d'individus ou de groupes, participent de façon active et délibérée. » (rapport Houllier et Merilhou-Goudard, 2016). Elles sont en fort développement depuis les années 1990 et sont particulièrement reconnues depuis une quinzaine d'année, ce qui a été inscrit dans la loi du 22 juillet 2013 relative à l'enseignement supérieur et à la recherche qui favorise « la participation du public à la prospection, à la collecte de données et au progrès de la connaissance scientifique ». Ce type de programme a initialement essentiellement concerné les sciences médicales et astronomiques. Dans le domaine des sciences naturelles, ce sont surtout les composantes faunistique et floristiques qui se sont d'abord développées. Les géosciences sont représentées depuis avec le programme Vigie-Ciel, de connaissance des météorites et de la géologie de l'espace.

Vigie-Terre, en gestation depuis quelques années, a été officiellement ouvert aux publics le 22 juin 2020. Le projet a été conçu dans le cadre du projet collaboratif « 65 millions d'observateurs » porté par le MNHN et financé par le Programme d'Investissements d'Avenir. Il a pour vocation à permettre le signalement rapide de nouveaux affleurements afin de favoriser leur étude et d'évaluer la valeur patrimoniale du site. En effet, si la fragilité de la géologie apparaît moins évidente que celle du vivant il n'en demeure pas moins que l'érosion, les activités d'aménagement du territoire, les bouleversements climatiques affectent les objets géologiques. Il est donc important de mobiliser un réseau de professionnels et d'amateurs pour identifier au plus vite ces sources d'informations et de connaissances. À ce jour, Vigie-Terre rassemble d'ores et déjà une trentaine de partenaires et est opérationnel sur l'ensemble du territoire national. Nous reviendrons dans cette présentation sur son historique, son développement et ses objectifs.

Lien

<https://vigie-terre.org/>

*Intervenant

†Auteur correspondant: asma.steinhausser@mnhn.fr

‡Auteur correspondant: gregoire.egoroff@mnhn.fr

§Auteur correspondant: isabelle.rouget@mnhn.fr



Enseigner les Sciences de la Terre grâce au numérique à l'aide du site de ressources EDUTERRE

Isabelle Veltz ^{*1&2}, Nathalie Pajon-Perrault ^{1&3}, Christine Cottard ¹, Hélène Toussaint ^{1&3}, Vincent Voisin ^{1&3}, Françoise Morel-Deville ¹, Marie-Josée Broussaud ¹

¹ Institut Français de L'Education (Ifé) - France.

² Laboratoire des Sciences de la Terre et de la Vie LTG Roosevelt Reims - France.

³ Rectorat de l'académie d'Orléans-Tour - France.

Le site web Eduterre produit des ressources numériques pour l'enseignement des Sciences de la Terre et de l'environnement. Il est destiné aux enseignants du secondaire et du supérieur, aux étudiants, aux lycéens et aux collégiens. Ce site web est alimenté par des publications mises au point par des enseignants et des scientifiques. Il est hébergé à l'ENS de Lyon et fait partie d'ACCES (Actualisation Continue des connaissances des Enseignants en Sciences) de l'Institut Français de l'Education (Ifé).

Eduterre propose des ressources numériques pédagogiques sur tout le panel des Sciences de la Terre : géodynamique interne et externe, pédosphère, hydrosphère, énergie, ressources naturelles, stratigraphie, temps, risques naturels, minéralogie ...

Ces ressources s'appuient sur les S.I.G., des K.M.L. et des banques de données. Les outils numériques, déjà incontournables dans l'enseignement, sont devenus vitaux pendant le confinement. Nos productions ont d'ailleurs permis aux enseignants, pendant la crise sanitaire, de faire réaliser des activités pratiques numériques aux élèves à distance et ainsi de leur permettre de développer de nombreuses compétences.

Ces publications sont élaborées à partir des données fournies par nos partenaires (BRGM, DIREN, MnHn, Geopolis ...), des bases de données scientifiques en ligne (Ifremer, Jamstec, NOAA, IPCC, IODP...) et de nombreux universitaires ou professionnels des géosciences. Nous proposons aussi des tutoriels et des outils d'autoformation pour l'utilisation des logiciels scientifiques en ligne (Gravity Database, BYOE, Disaster Alert ...).

Eduterre met à disposition en accès libre des productions bien évidemment liées aux programmes scolaires (collège et lycée) et universitaires, mais aussi des synthèses et des pistes pédagogiques sur des sujets plus transversaux. Ces derniers permettent aux enseignants de poursuivre leur formation et de pouvoir anticiper les prochaines préoccupations de la société. <http://eduterre.ens-lyon.fr>

Mots-Clés : EDUTERRE, éducation, lycée, collège, université, Sciences de la Terre, géodynamique interne, géodynamique externe, sol, eau, climat, énergie, risques, TICE, SIG, KML, outils pédagogiques, formation des enseignants.



T17.1 Hydrogéologie



Analyses multidisciplinaires de l'infiltration des eaux superficielles aux eaux souterraines : Cas du barrage de Djorf Torba et nappes sous-jacentes (Région de Béchar, sud-ouest, Algérie).

Ameri Sara* Laboratoire ENARGARID, Université TAHRI Mohamed, Béchar, BP 417, Algérie

Mekkaoui Abderrahmane Laboratoire FIMAS, Université TAHRI Mohamed, Béchar, BP 417, Algérie

Nabou Mohamed Département de mécanique, Université «TAHRI Mohamed » Béchar. BP 417, Algérie.

Cette recherche vise une approche multidisciplinaire pour l'étude de l'infiltration des eaux superficielles vers les nappes sous-jacentes, par le biais du barrage de Djorf Torba. Le débit infiltré est calculé par l'équation du bilan hydrique de cet ouvrage et l'estimation de la réserve régulatrice de la nappe quaternaire. Le barrage de Djorf Torba, imposant ouvrage érigé sur l'oued Guir, appartient au territoire de la région de Béchar, qui se situe dans le Sud-ouest d'Algérie. Ce barrage contrôle le bassin versant de haut Guir de 22068 km². Il est implanté sur le bord méridional du bassin sédimentaire crétacé de Béchar, au niveau des gorges calcaires turoniens. Il a créé une retenue de 360 Hm³, induisant une infiltration deux nappes sous-jacentes turonienne et quaternaire. Ce phénomène est étayé par différentes approches : **(i) Géologie du site** ; la nature lithologique des fondations est favorable aux infiltrations, ce sont des calcaires turoniens fracturés à petits karsts et des calcaires à travertins quaternaire. **(ii) Hydrodynamisme des nappes**, ce barrage est doté de 66 piézomètres d'auscultation, ouverts dans deux nappes, dont les chroniques d'auscultation exhibent des fluctuations concordantes aux variations de l'hauteur d'eau dans la retenue, à l'exception des piézomètres distaux. Les cartes piézométriques dressées aux cotes; maximale de 697.67m et minimale de 693m (NGA), montrent la présence de deux dômes de recharge, liés aux oueds de Guir et de Méridja. A la cote de la retenue >695m (NGA), les infiltrations deviennent plus amples, car l'eau de la retenue frôle les failles affectant le Turonien et une doline sur la rive gauche, et les piézomètres indiquent des remontées rapides, voir même des débordements. **(iii) Statistiques**, 72,7% des piézomètres d'auscultation manifestent des fluctuations, en parfaite concordance avec les cotes d'eau de la retenue, traduisant un coefficient de corrélation "r" de 0.6 à 0.94. **(iv) Hydrochimie**, les eaux de la nappe turonienne sont plus minéralisées par rapport aux eaux de la retenue. Ces variations de concentration des éléments sont à l'image des variations reconnues dans les eaux de la retenue. Le débit infiltré est estimé en se basant sur le bilan hydrologique et sur les réserves régulatrices de la nappe quaternaire à travertins. L'infiltration globale est estimée à 22.57 Hm³/an, soit 6.27% de la capacité totale du barrage. La nappe turonienne reçoit 17.56Hm³/an comme infiltration annuelle moyenne et 5.01Hm³/an pour la nappe quaternaire à travertins. Ces approches corroborent amplement la création d'un point de recharge des eaux souterraines, notamment pour la nappe turonienne.

Mots-Clés : Djorf Torba, retenue, approches, infiltration, piézomètres.



Effets conjugués des contraintes naturelles e actions anthropiques sur le système hydrogéologique des oasis de la saoura (sud-ouest, algérie)

Ameri Sara^{*1}, Mekkaoui Abderrahmane²

¹ Laboratoire enargarid, université tahri mohamed, béchar, bp 417, Algérie

² Laboratoire "FIMAS", Université TAHRI Mohamed, Béchar, BP 417, 08000, Algérie

Texte :

Cette étude vise à révéler les impacts conjugués des contraintes naturelles et des actions anthropiques sur les ressources en eaux dans les oasis de la vallée de la Saoura, afin d'entreprendre des actions réfléchies, permettant d'envisager leur pérennité. Il s'agit d'une célèbre entité géographique, qui doit son nom à l'oued Saoura, représentant un principal émissaire dans le Sud-Ouest algérien. Cet oued résulte de la confluence à Igli, des oueds Guir et Zousfana, et c'est ainsi qu'il bénéficiait des leurs écoulements. en plus, Cette contrée se dispose des eaux souterraines, agencées en un système, comptant deux compartiments : oriental actif, se composant de la nappe de l'erg, des nappes des terrasses et l'inféroflux, qui communiquent entre elles et occidental passif, qui compte la nappe de hamada de Guir et nappe cambro-ordovicienne. Le compartiment oriental est vulnérable à la salinité de l'inféroflux. dans les années soixante, les eaux de la Saoura étaient abondantes et de meilleure qualités.

Aujourd'hui, les écoulement sont devenus rares, les mares se sont effacées du paysage, et les eaux souterraines connaissent un remarquable rabattement. L'inféro flux de la Saoura est devenu hyper salé à RS>15000mg/l, les eaux de terrasses sont salées. Seules, les nappes de l'Erg et Hamada de Guir sont épargnées de ce changement.

Les nitrates (NQ⁻) font apparition dont le teneur varient de 1.4 à >160mg/l, et 22% des analyses dépassent la norme prescrite de l'OMS.

une telle situation s'explique par le déficit hydrique de la Saoura, causé par des longues périodes de sécheresse récurrentes et au verrouillage de l'oued Guir par le barrage de Djorf Torba situé à la tête decette entité. Les conditions géologiques imposent une remarquable vulnérabilité au système hydrogéologique. La contrainte démographique se traduit par une prolifération des captages, des pompages excessifs, et des rejets liquides affectent négativement la qualité de ces ressources.

Enfin, si on ne peut rien face aux facteurs naturels, les actions anthropiques doivent être explorer à différentes échelles et horizons, dont la gestion intégrée est primordiale au développement durable.

Mots-clés: Saoura, eau, contraintes naturelles, détérioration. gestion intégrée



Fonctionnement hydrogéologique des systèmes lagunaires méditerranéens et anthropisation des territoires, exemples du Sud de la Corse

Eléa Crayol ^{*1,2}, Frédéric Huneau ^{1,2}, Emilie Garel ^{1,2}, Alexandra Mattei ^{1,2},
SébastienSantoni ^{1,2}

¹ Université de Corse Pascal Paoli, Faculté des Sciences et Techniques, Département d'Hydrogéologie, Corte, France

² CNRS, UMR 6134, SPE, Corte, France

En Méditerranée, les hydrosystèmes côtiers sont souvent tributaires des eaux souterraines, cependant la connaissance de leur fonctionnement hydrogéologique, pourtant indispensable à leur bonne gestion demeure méconnu.

L'objectif de ce travail est d'appréhender et de modéliser le fonctionnement hydrogéologique des lagunes méditerranéennes particulièrement exposées aux changements globaux. Trois sites pilotes en Corse-du-Sud, présentant des différences morphologiques, géologiques, hydrologiques et d'anthropisation ont été sélectionnés afin d'identifier le degré de dépendance de ces milieux aux eaux souterraines et les perturbations qualitatives d'origine anthropique sur les flux d'eau.

Un travail de cartographie a permis de délimiter avec précision les limites géographiques des bassins versants dans l'objectif d' (1) identifier l'ensemble des flux superficiels et souterrains contribuant à ces systèmes, (2) identifier les sources potentielles de pollutions, (3) élaborer un plan d'échantillonnage pertinent permettant la quantification.

Pour tracer les contributions des différents compartiments de l'hydrosystème, les outils de l'hydrologie isotopique (isotopes stables de la molécule d'eau) et de la géochimie ont été employés pour la première fois sur ces sites afin de cartographier les signaux géochimiques et isotopiques sur le bassin versant, puis d'élaborer des modèles de mélanges afin d'expliquer les teneurs observées dans les lagunes. Une méthodologie inédite combinant le traçage des flux de pollution anthropique (pesticides, ¹⁵N, polluants émergents), permettra de caractériser la sensibilité de ces systèmes de façon prospective.

Les résultats obtenus se veulent transposables et permettront de réaliser des projections sur la qualité de l'eau et sa quantité. Ce travail a pour finalité d'aider les gestionnaires à maintenir le bon état des différentes masses d'eau en connexion hydraulique avec les hot-spots de biodiversité lagunaires méditerranéens.

Mots-Clés : Hydrogéologie – géochimie – hydrologie isotopique – lagunes méditerranéennes – eaux souterraines



Cartographie des potentialités hydriques de la région des Monts des Ksour (Sud-Ouest de l'Algérie) par l'utilisation de la télédétection et les SIG

Abdessamed Derdour* ¹, Yacine Benkaddour², Brahim Bendahou³

¹Laboratoire de Gestion durable des ressources naturelles des zones arides et Semi- arides naturelle /CentreUniversitaire Salhi Ahmed de Naâma – Algérie.

^{2,3}Direction des Ressources en Eau de la Wilaya de Naâma – Algérie

L'accès à l'eau potable, notamment dans les zones arides et semi-arides en Algérie marquées par des sécheresses prolongées, constitue un facteur primordial dans le développement économique, l'amélioration du niveau de vie des populations et leur stabilisation dans ces zones.

En plus de l'alimentation en eau potable de la population qui ne cesse de croître, l'agriculture représente la première activité socio-économique de la région des Monts des Ksour et la plus consommatrice des ressources hydriques.

L'objectif de notre étude est de cartographier les potentialités de l'eau souterraine de la zone d'étude pour favoriser l'implantation des forages productifs en vue d'améliorer l'approvisionnement en eau potable et d'irrigation et la gestion efficace face aux besoins sans cesse grandissants de la population.

Le recours à la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) constitue une solution très efficace comme outils d'aide à la décision et à la gestion des différents problèmes en hydrogéologie.

La démarche méthodologique adoptée dans notre étude s'articule autour de trois étapes : Tout d'abord, l'extraction des bassins versants de la région des Monts des Ksour et déterminer leurs caractéristiques géomorphologiques, hydrologiques, hydrogéologiques et climatiques par l'application de la télédétection et des SIG. Ensuite vient, la deuxième étape qui sera dédiée à la localisation et l'identification des zones potentielles d'eaux souterraines à travers toute la zone d'étude, par la combinaison des différentes cartes thématiques par la méthode d'agrégation des critères. Enfin, vient la phase de la validation, et la comparaison de nos résultats avec les données de l'inventaire exhaustif des points d'eau de la région.

Cette carte de potentialité en eau souterraine classée en cinq classes (Excellent, Bon, Moyen, Faible, Très Faible) peut guider la prise d'une bonne décision pour une gestion efficace et efficiente des ressources en eau souterraine dans la région des Monts des Ksour.

Mots-Clés : SIG; Télédétection; Monts des Ksour; Cartographie; Potentialité en eau



Suivi de l'origine de l'eau de surface au cours de la période de tarissement estivale. Application aux Gardons cévenols (France).

Maxime Gillet^{1, 2*}, Pierre Alain Ayrat^{2, 3}, Corinne Le Gal La Salle¹, Patrick Verdoux¹, Somar Khaska¹, Philippe Martin³, Jean François Didon-Lescot³, Jean-Marc Domergue³, Nadine Grard³, Christian Lopez²

¹ Université de Nîmes équipe d'accueil Chrome France

² LGEL, IMT Mines Ales, Ales, France

³ UMR 7300 Espace CNRS, Université d'Avignon France

En zone méditerranéenne, l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse prévoit une diminution de 60 % des débits lors des étiages, laissant présager de difficultés accrues pour la gestion de l'eau dans ces régions. Afin de répondre à cette problématique émergente, la présente étude s'intéresse à la caractérisation et à la quantification de la contribution des réservoirs souterrains aux écoulements de surface en période de basses eaux. La méthode utilisée se base sur une analyse de la signature géochimique des eaux des différents réservoirs géologiques dans un bassin versant hétérogène.

Une campagne de prélèvement, à minima bi-hebdomadaire d'eaux des sources, de forages et d'eaux de surface a été réalisée lors des étés 2018 et 2019 sur les bassins versants des Gardons (54 sources, 9 forages et 27 eaux de surfaces). Une attention particulière a été mise en œuvre pour répartir spatialement les prélèvements d'eau de surface sur l'ensemble des sous-bassins versants. La signature géochimique des eaux souterraines correspondant aux différentes géologies a été ainsi identifiée. Pour chaque station de prélèvement d'eau de surface étudiée, la part d'eau provenant des différents réservoirs en présence a été calculée pour chacune des périodes estivales en utilisant le modèle de mélange Glue-EMMA.

Les résultats montrent des différences significatives entre les sous-bassins en termes de contribution des différents réservoirs en lien avec la nature géologique du bassin versant. Néanmoins, on observe une différence notable entre la contribution des réservoirs et leurs superficies affleurantes. Certaines formations comme les micaschistes noirs ont un apport disproportionné par rapport à leurs superficies affleurantes. Ils contribuent à près de 70 % du débit en étiage et ne sont présents que sur moins de 30% de la surface totale du bassin versant. Enfin, la dynamique de tarissement des réservoirs est également observable. Pour chaque bassin versant, on distingue deux types de réservoir, ceux dont le débit se maintient et ceux dont le débit s'effondre en étiage.

L'analyse spatio-temporelle de ces résultats permet donc une meilleure compréhension de la dynamique de contribution des eaux souterraines aux écoulements de surface des bassins versants et donne des informations essentielles pour une meilleure gestion de la ressource eau notamment au niveau de la protection de réservoirs clés dans le soutien à l'étiage.

Mots Clefs: étiage, eaux souterraines, géochimie, Cévennes



Variabilité des interactions entre nappes, gravières et rivières dans la plaine de la Bassée, France

Anne Jost ^{*1}, Adem-Ilyes Chader ¹, Nicolas Flipo ², Amer Mouhri ¹, Léna Abasq ², Baptiste Labarthe ², Agnès Rivière ², Edmée Cuisinier ², Fulvia Baratelli ¹, Shuaitao Wang ¹, Fanny Picourlat ¹, François Colleoni ¹, Romane Nespoulet ¹

¹ Sorbonne Université, CNRS, EPHE, Metis, France

² Université Paris Sciences & Lettres, Mines ParisTech, Centre de Géosciences, France

L'analyse des séries temporelles hydrologiques est un atout majeur pour l'étude du comportement des hydrosystèmes et la caractérisation de leur dynamique en réponse aux forçages qui leur sont imposés, qu'ils soient naturels ou anthropiques. Elle permet l'identification des facteurs prépondérants à l'origine des fluctuations des cotes de l'eau dans les différents compartiments de surface et souterrains. Elle repose sur l'acquisition de mesures *in situ* et à haute fréquence. Un tel réseau de surveillance des niveaux d'eau a été déployé depuis cinq ans le long du corridor alluvial de la Seine, entre ses confluences avec l'Aube et l'Yonne. Dans cette plaine à caractère humide, dite de la Bassée, le chevelu hydrographique est marqué par l'anthropisation. Cours d'eau, noues et gravières interagissent avec les nappes de la craie et des alluvions. La variabilité de leurs échanges est ici étudiée au prisme des chroniques disponibles. Un accent particulier est mis sur la compréhension de la dynamique des gravières qui peuplent en nombre la plaine et dont les variations spatio-temporelles seront bientôt accessibles à l'observation satellitaire du programme SWOT (Surface Water and Ocean Topography).

Mots-Clés : Echanges nappe-rivière, écoulements souterrains, gravières, séries temporelles, Bassée



Réponse hydrologique d'un cours d'eau en contexte péri urbainet implication dans le transport particulaire en contextes forestier vs urbain (cas de l'Egoutier, Loiret, France)

Lauriane Ledieu^{*1}, Anaëlle Simonneau¹, Olivier Cerdan², Thomas Grangeon²,
ValentinLandemaine², Fatima Laggoun¹

¹Univ. Orléans, CNRS, BRGM, ISTO, UMR 7327, F-45071, Orléans, France

²Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Département Risques et Prévention, 3 Avenue Claude Guillemin, Orléans, France

La réponse hydrologique d'un bassin versant est un phénomène complexe dont la variabilité spatio-temporelle est difficile à comprendre et à quantifier. Ce processus résulte de la combinaison de nombreux facteurs tels que le climat, la géomorphologie, la composition et la texture des sols ainsi que leur occupation. L'imperméabilisation des surfaces rend la réponse hydrologique plus rapide en contexte urbain et les activités anthropiques peuvent décupler les taux d'érosion en modifiant les propriétés physiques du sol ou facilitant les chemins de transfert. Face à une urbanisation croissante, il est pourtant d'un intérêt majeur d'étudier la réponse hydrologique des cours d'eau en zones périurbaines, compte tenu de son rôle dans les cycles sédimentaire et géochimique, et notamment ceux des contaminants. Dans ce contexte, cette étude s'intéresse à l'effet de la mosaïque d'occupation des sols (forestier vs urbain) sur 1/ la réponse hydrologique d'un cours d'eau : l'Egoutier (Loiret, France – site atelier OBSCURE ZA Loire, SNO Observil), et 2/ la dynamique sédimentaire qui en résulte. La stratégie mise en place repose sur une combinaison hydrologie/géochimie, avec : 1/ 3 stations d'acquisition haute résolution des variables hydrologiques, réparties dans le bassin versant, 2/ des échantillonnages réguliers des sols, matières en suspension et sédiments en transit dans le cours d'eau, et 3/ une caractérisation géochimique de l'ensemble des échantillons. Les résultats démontrent que la présence d'un étang au centre du bassin versant entraîne une déconnexion entre les flux amont et aval. Cela autorise une comparaison de la dynamique hydro-sédimentaire dans ces deux espaces et notamment une comparaison des contextes forestier et urbain. La saturation saisonnière des sols en amont est bien démontrée par des volumes ruisselés plus importants, surtout en hiver. L'imperméabilisation de la partie aval entraîne une genèse d'épisodes de crue plus récurrente et des événements de crue plus courts. La comparaison des réponses hydrologiques aux mêmes épisodes pluvieux démontre toutefois des gammes de temps de réponse semblables, compris entre 0.2 et 4.9 heures. La différence de comportement entre les deux contextes apparaît alors surtout liée à la pluviométrie et la saison. En effet, les volumes ruisselés peuvent être plus importants en contexte forestier pour de faibles pluviométries. Ces derniers deviennent supérieurs en contexte urbain lorsque la pluviométrie excède 4 mm, et cette différence est d'autant plus grande en été. Lorsque des événements pluvieux dépassent 15 mm en automne et en hiver, la tendance s'inverse, soulignant l'effet de la saturation des sols hydromorphes et le drainage des nappes perchées. Bien qu'une réactivité et des flux importants soient observés dans les deux contextes, des temps de transfert plus courts en contexte urbain engendrent une meilleure capacité de transport sédimentaire. Considérant que les zones artificialisées émettent également des contaminants, le transfert de contaminants adsorbés en phase particulaire est alors facilité.

Mots-Clés : hydrologie, ruissellement, couvert forestier, contexte urbain



Ecological role of karstic groundwater in peatlands in the context of climate change. The case study of the Frasné peatland (Jura Mountains, France)

Lhosmot Alexandre ^{*1}, Collin Louis ², Magnon Geneviève ², Steinmann Marc ¹,
BertrandCatherine ¹, Stefani Vanessa ¹, Toussaint Marie-Laure ¹, and Bertrand
Guillaume ¹

¹University of Bourgogne Franche-Comté, UMR UFC CNRS 6249 Chrono-Environnement, France

²EPAGE Syndicat Mixte Haut-Doubs Haute-Loue, France.

Groundwater (GW) inputs potentially modify the hydrological cycle of peatlands and associated downstream ecosystems in karstic regions. However, the interplay between ground and surface water is complex and depends on climatic conditions and land-use.

Suspected in the Jura Mountains since decades, we present here a study on the ecological role of karst-peatland interactions realized in the Forbonnet bog (Frasné peatland complex, 46.826 N, 6.1754E, 852 m a.s.l.). The bog has been restored in 2015-16 by backfilling of artificial drains.

The site is located in a wide karstified syncline covered by moraine deposits. We hypothesize the presence of complex interactions between peat, moraine and karst reservoirs dependent on hydraulic conditions and modified by climate change and mitigation programs.

Five years of the peatland outlet monitoring highlights a multiscale range of water supply mechanisms. Mean summer Electrical Conductivities (EC, June-October) are positively correlated with total rainfall of the preceding winters (P, November-May), suggesting that karst GW inputs in winter mainly drive the summer baseflow. In spring and autumn, the non-linear relationships between P, T and discharge imply interactions between saturated and non-saturated peat layers. Finally, winter outflow is characterized by fast responses to P events, suggesting overflow of the saturated media.

To better explain these interactions, both EC profiles variability and contrasted hydraulic head response to restoration allowed to identify various exchange processes. A range of advective-diffusive GW upflows from the karst could sustain the ecosystem functions.

This multi-proxy approach argues in favor of a nested hydrological system involving various water origins: (i) regional karstic GW, (ii) lateral seepage from the neighboring elevated wooded peatlands and (iii) local rainfall. Ongoing work aims to quantify these water fluxes in more detail in order to improve peatland management.

Keywords: Peatland restoration, Karst, Nested hydrological network, Climate change, Groundwater-dependent ecosystem



Détail d'une structure régionale majeure par méthodes géophysiques combinées – cas de la faille de Fécamp-Lillebonne (Seine-Maritime, France)

Baptiste Meire ^{*1}, Pierre-Yann David ¹, Thomas Jacob ¹, Angélie Portal ¹, Adnand Bitri ¹, Didier Pennequin ¹, Emmanuel Hauchard ²

¹ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

² Communauté d'agglomération Le Havre Seine Métropole - France

La faille de Fécamp-Lillebonne, située dans le département de la Seine-Maritime, est l'une des structures tectoniques majeures de la partie ouest du Bassin de Paris. Elle traverse le Pays de Caux sur plus de 25 kilomètres, et s'inscrit dans la continuité des failles de la Seine, de Rambouillet et d'Etampes. Vers le nord, cet accident se prolonge en Manche en prenant progressivement une orientation Est-Ouest. Il s'agit d'une faille normale-décrochante dextre, orientée N150°, à regard vers l'ouest. Le rejet vertical varie de 40 à plus de 150 m le long de son tracé, ce qui met localement en contact des formations géologiques aux faciès parfois très différents : contact anormal entre les craies dures à silex du Coniacien (craies de Saint-Pierre-en-Port), avec les niveaux argilo-sableux et glauconieux de l'Albien et du Cénomanién inférieur, ce qui peut avoir une influence sur les écoulements hydrogéologiques.

Les récents profils sismiques réalisés au large de Fécamp dans le cadre de la mise à jour de la cartographie géologique de la baie de Seine ont permis d'améliorer la connaissance de la géométrie de la faille en mer. Ces profils mettent en évidence une structure cassante verticale associée à une structure antiforme asymétrique bien marquée au nord-est, et à une structure synforme à large longueur d'onde au sud-ouest. A terre, entre Lillebonne et Bolbec, les investigations géophysiques et géologiques menées par le BRGM entre 2017 et 2019 ont également permis de préciser la géométrie de cette faille, qui prendrait la forme d'une structure en tresse, constituée d'une "bande faillée" large d'environ 300 à 500 m, formée d'un faisceau de 2 à 4 failles subparallèles N150°, présentant des rejets variant de 10 à 30 m, pour un rejet vertical cumulé approchant 125 m. Ce faisceau de failles, associé à des cassures satellites N60°, isolerait des compartiments prismatiques basculés, disposés « en marches d'escalier », et prenant parfois la forme de fossés d'effondrements.

Sur la base de ces résultats, un nouveau schéma structural a pu être proposé entre Fécamp au nord et la vallée de la Seine au sud. La confrontation des informations structurales avec les données hydrogéologiques permet en outre de mieux cerner le rôle que peut avoir cette faille sur le développement de l'un des réseaux karstiques les plus importants de la Normandie Crayeuse.

Mots-Clés : Faille de Fécamp-Lillebonne, gravimétrie, profils électriques, profils sismiques, schéma



structural, hydrogéologi

Diversité fonctionnelle des mécanismes de recharge des aquifères méditerranéens : mise en évidence par les isotopes stables de l'eau sur un territoire à la géologie et à l'hydroclimatologie hyper-contrastées (Corse, France)

Bertil Nlend ^{*1,2}, Frédéric Huneau ^{1,2}, Emilie Garel ^{1,2}, Sébastien Santoni ^{1,2},
Alexandra Mattei ^{1,2}

¹ Département d'Hydrogéologie, Université de Corse Pascal Paoli, Faculté des Sciences et Techniques, Corte - France

² UMR 6134 SPE, CNRS, Corte – France

La Corse constitue un territoire à la géologie et à l'hydroclimatologie très diversifiées créant des conditions hydrogéologiques complexes et des mécanismes de flux de recharge encore peu connus. Un suivi de la composition isotopique des pluies est effectué depuis 2013 sur 10 stations bien réparties sur l'ensemble de l'île. Parallèlement à ce suivi, les eaux souterraines ont également été collectées, à l'occasion de plusieurs études, en milieux sédimentaires, granitique, métamorphiques et ce sur des réservoirs karstiques, alluviaux, captifs, semi- captifs, thermo-minéraux pour déterminer leurs teneurs en isotopes stables ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$). L'objectif de ce travail est donc de comprendre et de préciser les mécanismes associés à l'infiltration des eaux de pluie et à la recharge des aquifères dans chaque type d'environnement hydrogéologique en tirant partie de cette banque d'informations. L'origine du signal d'entrée des aquifères est premièrement appréciée par l'interprétation des valeurs d'excès en deutérium combinées aux rétro-trajectoires des masses d'air. Les données de pluie sont ensuite confrontées aux données d'eaux souterraines. La signature isotopique des aquifères s'aligne en général bien sur les droites météoriques correspondantes indiquant une recharge actuelle et bien localisée. Cependant, la signature des eaux souterraines n'est que rarement en accord avec la signature moyenne pondérée des pluies locales. Pour certains environnements on observe une altération du signal isotopique de la pluie lors de l'infiltration vers l'aquifère. Ce phénomène peut être attribué à différents mécanismes et fait entrer en ligne de compte l'état de surface et l'antécédent hydrologique du sol. Ce travail soulève la problématique de la bonne prise en compte des caractéristiques spécifiques à chaque milieu géologique et l'importance de paramètres fondamentaux comme l'occupation des sols, la saisonnalité pluviométrique et la forte variabilité actuelle de l'hydroclimat insulaire.

Mots-Clés : Précipitation, aquifères, isotopes stables, recharge, Corse



The Aerobic Critical Zone: deep transport and reactivity of dissolved oxygen in fractured bedrock aquifers

Ivan Osorio ^{*1}, Camille Bouchez ¹, Julien Farasin ¹, Thierry Labasque ¹, Nicolas Lavenant ¹, Olivier Bour ¹, Laurent Longuevergne ¹ and Tanguy Le Borgne ¹.

¹Géosciences Rennes – Université de Rennes 1, CNRS : UMR 6118 – France

The persistence of dissolved oxygen in deep groundwater, sustains microbial life and biogeochemical reactivity, with potential impacts on large scale nutrient cycling. In aquifers, dissolved oxygen distribution is often heterogeneous and intermittent, but the driving factors of this variation remain poorly identified. This study is based in two fractured-bedrock catchments in Brittany, one under natural flow-regime and the other one under pumping regime. The study site is characterized by strong surface-groundwater connectivity, rapid hydrologic response and deep microbial hot-spots. Multi-parameter borehole-logs, CFC data and groundwater level time series from the period 2009-2019 were analyzed over 34 piezometers located both in recharge and discharge zones of both catchments. The variance of dissolved oxygen concentrations decreases with depth: shallow concentrations range between 2 - 8 mg/L while deep concentrations range between 0.05 – 2 mg/L. Resulting from the competitive effects of transport and reactivity, the observed distribution of dissolved oxygen concentrations with depth was modelled with an analytical solution of a first-order transport-reaction model, which allowed constraining Damköhler numbers related to dissolved oxygen in groundwater. Advection times and reaction rates were also estimated through Darcy's law calculations, CFC's interpretations and batch tests, allowing an independent estimation of Damköhler number range related to dissolved oxygen in groundwater. The spatial distribution of dissolved oxygen within the natural flow-regime catchment is transport-limited while being reaction-limited in the pumped site. Dissolved oxygen distribution is shaped by a different chemical reactivity linked to the weathering front. Moreover, preferential transport through fractures or enhanced hydraulic gradients under pumping conditions allow deep oxygen delivery and mixing between recent and aged groundwaters forming reactive hot-spots in subsurface.

Mots-Clés : Reactive transport; hotspot reactivity; Damköhler number; Critical Zone; fractured bedrock hydrogeology



T17.2 Zone critique, érosion et transfert sédimentaire



Hydro-sedimentary dynamics of a drained agricultural plot by tracing water and suspended solids

Arthur Gaillot ^{*1, 2}, Célestine Delbart ¹, Olivier Cerdan ², Pierre Vanhooydonck ¹, and Sébastien Salvador-Blanes ¹.

¹University of Tours. EA 6293 GéHCO. Tours, 37200. France

²Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

Since the 1960's, agricultural productivity of humid plains increased thanks to the widespread implementation of subsurface drainage, which is now present in more than 11 % of the arable lands in the world. Studies have shown drainage increases water and sediment connectivity. Research efforts are still needed to investigate its impact on the erosion dynamics from the soil profile to the field scale, as it is a key to set efficient conservation measures to reduce erosion. Therefore, we propose to trace water and suspended solids to determine their sources and pathways. The study site is a 5 ha cereal field located at the south of Tours (37, France) with surface and subsurface drainage. Suspended solids and water fluxes are monitored at high temporal resolution since January 2019. Since November 2019, physical, geochemical and isotopic tracers are used to identify water and sediment sources and transfer modality (subsurface flow or overland flow). Subsurface and surface water fluxes were equivalent but less than 11 % of suspended sediments were transferred by subsurface drainage. Water tracing shows two different transfer processes depending on the season and soil moisture. During winter, soil is saturated and subsurface runoff seems to result from a piston-like effect under the input of rainfall. During summer, a shorter subsurface lag of reaction is observed and can be explained by a direct transfer to the subsurface drainage through the soil macroporosity.

Mots-Clés : drainage, suspended sediment, geochemical tracer, water tracing, erosion



Géochimie de la phase particulière en transit dans le bassin versant périurbain de l'Egoutier (Loiret, France) : Rôle et effets des paramètres hydrologiques

Lauriane Ledieu^{*1}, Anaëlle Simonneau¹, Olivier Cerdan², Philippe Négrel²,
Valérie Laperche², Cécile Grosbois³, Fatima Laggoun¹

¹Univ. Orléans, CNRS, BRGM, ISTO, UMR 7327, F-45071, Orléans, France

²Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Département Risques et Prévention, 3 Avenue Claude Guillemin, Orléans, France

³Université de Tours. EA 6293 Géo-Hydrosystèmes COTinentaux (GÉHCO), Faculté des Sciences et Techniques, Tours, France

Le cycle biogéochimique des éléments au sein de la zone critique est régi par différents processus physiques, chimiques et biologiques (i.e. altération et érosion mécanique des phases porteuses, sorption, précipitation, fractionnement, ...). Les relations entre tous ces processus sont difficiles à établir étant donné la diversité des mécanismes qui se produisent, conjointement, indépendamment ou successivement, et qui sont sous l'influence de la dynamique hydrologique qui contrôlent taux d'érosion, flux et cascade sédimentaire. Compte tenu de l'importance du transport sédimentaire dans le cycle géochimique des éléments, il est crucial d'étudier les facteurs hydrologiques de contrôle sur la géochimie de la phase particulière selon une démarche source-puits. Cette étude s'intéresse au transfert d'éléments chimiques majeurs et traces (Ca, K, Ti, Fe, Mn, Rb et Sr) en lien avec l'altération et l'érosion des sols du bassin versant périurbain de l'Egoutier (Loiret, France – site atelier OBSCURE de la ZA Loire, SNO Observil). L'analyse des sols hydromorphes, des sédiments de fond et des matières en suspension dans le cours d'eau permet une description détaillée des processus. Les résultats démontrent une mobilité différente des éléments considérés à l'échelle des profils pédologiques. Certains éléments, comme K et Sr, ont une distribution homogène, tandis que Mn présente un enrichissement dans les horizons superficiels, et Ca, Fe et Rb, dans les horizons profonds. Cette distribution, principalement liée à la résistance des minéraux primaires à l'altération et aux interactions avec les phases minérales secondaires argileuses, confère ainsi des signatures géochimiques spécifiques aux différents horizons de sols. Dans le cours d'eau, ces signatures permettent d'identifier différents modes d'érosion mécanique (ruissellement, incision des berges), différents mécanismes intervenant dans l'érosion (sélectivité, fragmentation) et des capacités de transport différentes. Ainsi, le Mn est surtout enrichi en amont du bassin versant, où l'érosion des horizons de surface est plus importante, tandis que Fe et Rb sont enrichis en aval, où une plus forte érosion des berges a lieu. Les teneurs en K et Rb sont, elles, corrélées avec la pluviométrie et présentent une variabilité spatiale plus importante en période de hautes eaux. Des dilutions des apports en Mn par une plus faible contribution de ses phases porteuses sont alors observées en faveur de celles en K et Rb. Les apports en Ca, Sr et Fe sont corrélés avec l'intensité des événements pluvieux et leurs enrichissements sont plus élevés dans les matières en suspension prélevées en aval du bassin versant. Cette distribution suggère le lien important entre la dynamique des événements pluvieux, la sélectivité des particules érodées, les phénomènes d'incision affectant les sols du bassin versant et la capacité de transport du cours d'eau. Les teneurs en Ca peuvent toutefois être liées à des apports anthropiques.

Mots-Clés : altération, érosion, géochimie, transport sédimentaire



Evaluation quantitative de l'impact des activités humaines et des fluctuations climatiques sur l'érosion de la Zone Critique dans les Alpes depuis 10000 ans

William Rapuc^{*1}, Julien Bouchez², Pierre Sabatier¹, Jérôme Gaillardet^{2,3} and Fabien Arnaud¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, EDYTEM, 73000 Chambéry, France

² Université de Paris, Institut de physique du globe de Paris, CNRS, F-75005 Paris, France

³ Institut Universitaire de France

La Zone Critique (ZC) est impactée par les fluctuations climatiques et par l'augmentation de la pression anthropique, ce qui représente une menace potentielle pour le futur de l'humanité. L'érosion de la ZC est donc considérée actuellement comme l'un des enjeux majeurs des géosciences. De ce fait, il devient essentiel de quantifier l'influence de ces deux facteurs forçant, en particulier dans les zones de montagnes où l'érosion est la plus élevée. Seules des études combinant de larges approches spatiales et temporelles permettent d'évaluer l'effet des différents forçages sur les taux d'érosion des sols de la ZC. Ici, nous proposons d'utiliser une approche rétrospective basée sur les sédiments lacustres pour reconstituer l'évolution long terme de l'érosion dans les zones alpines. Les lacs du Bourget et d'Iseo, situés respectivement dans le nord des Alpes françaises et italiennes, servent de réceptacles naturels pour tous les produits d'érosion de leurs grands bassins versants. Nous appliquons une étude multiproxy à partir de séquences sédimentaires lacustres avec une méthode source-puits combinée à des traceurs isotopiques (ϵNd , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$). Cette méthodologie nous permet de démêler le rôle des facteurs de forçage de l'érosion à travers leur impact différentiel sur les différents types de roches des bassins versants. En effet, les zones de haute altitude des deux sites d'étude, où l'érosion est dominée par les précipitations et l'avancée des glaciers, présentent une signature isotopique différente de celles des roches sédimentaires situées dans le reste du bassin versant, où l'érosion à travers le temps est impactée à la fois par les activités humaines et le climat. Depuis 3800 ans, les fluctuations climatiques ne peuvent à elles seules expliquer les tendances d'érosion mesurées. Dès lors, les activités humaines, en modifiant l'érodabilité des sols par l'utilisation des terres, deviennent le facteur de forçage dominant de l'érosion des Alpes européennes.



T17.3 Sols, devenir des éléments dans la zone critique : cycle bio-géochimique des éléments, bio-géochimie et physico-chimie des interfaces, altérations, géophysique de sub-surface



Effets des ajouts de caoutchouc et PET sur les propriétés hydromécaniques des matériaux en terre crue

Marouan Bajbouji^{*1}, Khalid Rkha chaham¹, Saad Bensallam²

¹ Département de Géologie, Faculté des Sciences Semlalia, université cadi ayyad, Laboratoire de Géorressources, Géoenvironnement et Génie civil (L3G) – Maroc

² EHTP – Ecole Hassania Des Travaux Publics – Maroc

De nos jours, les exigences économiques et environnementales sont les principales préoccupations des décideurs, qui ont tendance à privilégier de plus en plus l'économie circulaire à faible impact environnemental. Ce travail rentre dans cette optique, et s'intéresse à un nouveau matériau de construction, associant de la terre, de la chaux et des agrégats recyclés de caoutchouc et/ou de polyéthylène (PET).

Certes beaucoup de travaux ont porté sur cette problématique d'ajout de Caoutchouc ou de PET mais jamais en les associant. C'est le sens même du travail que nous présentons. Le matériau choisi est à base d'agrégats naturels, de liant, de débris de caoutchouc et de PET. Au laboratoire, on fait varier le volume, la taille et la forme de ces ajouts et on soumet les matériaux à des séries de tests et d'essais, à la fois à l'état frais et durci, afin d'étudier son comportement en termes de résistances à la compression, à la flexion et à l'impact.

Dans cet exposé nous présenterons quelques résultats préliminaires notamment en ce qui concerne les pourcentages limites à partir desquels les ajouts deviennent nuisibles aux caractéristiques mécaniques du mélange. Nous présenterons également les résultats préliminaires concernant les essais sur matériaux associant Caoutchouc et PET. Association qui se révèle intéressante et prometteuse en termes de gain de résistance.

Mots-Clés : granulats de caoutchouc, PET, Béton, Résistance à la compression, Perméabilité à l'eau.



Stable Mg isotope ratios help in identifying base cation sources of stream water in the boreal Krycklan catchment (Sweden)

Emile Bolou-Bi ^{*1,2}, Arnaud Legout ³, Hjalmar Laudon ⁴, Kevin Bishop ² and Stephan Köhler ⁵

1. UFR des Sciences de la terre et des ressources minière, Université Felix Houphouët-Boigny - Côte d'Ivoire
2. Department of Earth Science, Uppsala University - Suède
3. Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers, INRAE - France
4. Department of Forest Ecology and Management, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU) - Suède
5. Department of Aquatic Sciences and Assessment, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU) - Suède

The knowledge of the sources of base cations in streamwater is a prerequisite to assess potential effects of changing environmental conditions such as changing rainfall, weathering or groundwater fluxes on cation export with stream water. This study use stable Mg isotopes to identify sources in the well-studied forested catchment of Krycklan located on gneissic bedrock covered by quaternary sediments in Sweden. Samples were collected from open field rain, throughfall, stream, soil, rock and litterfall. The $\delta^{26}\text{Mg}$ values of these samples was determined and the contributions of different sources to Mg fluxes in the streamwater were determined from the variation of the Mg isotope and Sr/Mg ratios.

The results show an overall variation of 1.10‰ between all samples. Mg isotope ratios displays little variation in the streamwater and soil solution, except during snowmelt periods. During this period, a large portion of the annual runoff occurs. Mg in the streamwater is explained as a mixture of three pools (open field rain, soil solution and groundwater) with the latter two influenced by catchment processes. Mg in streamwater mainly derived from the groundwater, with a contribution ranging from 12 to 63% to Mg fluxes. Open field rain dominates Mg fluxes in streamwater during spring flood (78%) and may contribute significantly during larger summer and autumn rainfall events. Soil solution input to streamwater range from 16 to 59% of Mg fluxes in streamwater. Our results demonstrate that $\delta^{26}\text{Mg}$ values together with Mg concentrations and Sr/Mg ratios can be used to constrain the Mg sources of streamwater and quantify weathering release rates, ranging in this catchment from 0.52 to 1.178 kg Mg.ha⁻¹.yr⁻¹

Key words: Magnesium, Stable isotope, Streamwater, Silicate Weathering, Forest, Catchment, Krycklan, Sweden.



The use of Silicon and Rare Earth Elements for a better understanding of the traceability and bioavailability of Phosphorus in agricultural soils

Jonathan Mulot ^{1*}, Olivier Pourret ¹

¹ Institut Polytechnique UniLaSalle, Beauvais, France

Phosphorus (P) is an essential nutrient for health. It is the second most abundant chemical element in the human body. For plants, P is necessary for their growth and proper development. As a result, this element is commonly used as a fertilizer and has become excessive in some ecosystems, leading to instability in wildlife. In order to reduce and optimize P fertilizers in agricultural soils, it is necessary to better understand P behaviour and its bioavailability. This study attempts to explore the possibility of using silicon (Si) combined with rare earth elements (REE) to trace P.

Different chemical analyses were performed on samples from the regions of Haut de France (France) and Wallonia (Belgium). The P concentration seems to increase when the Si concentration is low. These two elements are anti-correlated. Moreover, REE are commonly used in geochemistry to trace different types of elements due to their unique properties. In combination with total organic carbon (TOC) measurements, which indirectly reflect the amount of organic matter in solution, the concentration of REE increases. Furthermore, some comparisons show that REE and Si are related. Indeed, when the amount of REE increases, Si increases. Because of the relationship between REE, Si and P, Si could be indirectly a tracer of the amount of P in soils solutions. Further analysis looking at Si isotopes and REE patterns will further constrain our results.

Mots-Clés: Silicon, phosphorus, rare earth elements, geochemistry, soils



**T18.1 INSU TS : restitution des
grandes orientations scientifiques
qui auront été pointées par la
section 18 et la CS TS**

**T18.2 INSU TS : groupe de travail
sur les archives**



CoreBook et la Cyber-carothèque nationale : deux outils pour bancariser des métadonnées riches lors des opérations de carottage scientifique (continental, marin, glaciaires)

Fabien Arnaud^{1*}, Cécile Pignol¹, Xavier Crosta², Isabelle Billy², Bruno Galabertier¹,
Pascal Calvat³, Julien Penguen³, Elodie Godinho⁴, Karim Bernardet⁴

¹EDYTEM, CNRS, Université Savoie Mont-Blanc, France

²EPOC, CNRS, Université de Bordeaux,

France ³OASU, CNRS, Université de
Bordeaux, France ⁴DT-INSU, CNRS,

France

La bancarisation des données demeure défi majeur pour la recherche scientifique. Dans les domaines des géosciences basées sur l'étude d'échantillons, un retard considérable a été pris pour de multiples raisons. Ce problème est comparable à celui des « Longues traînes » de données, ces données produites de manières disparates par un grand nombre d'acteurs déconnectés les uns des autres et qui constituent à la fois, la grande majorité des activités de recherche dans le monde et un défi pour la bancarisation des données. Profitant des moyens financiers et de la visibilité nationale offerts par le projet d'équipement d'excellence CLIMCOR (2013-2019), les laboratoires EPOC et EDYTEM, la DT-INSU et l'OASU, ont joint leurs efforts pour proposer une réponse communautaire et « FAIR » à ce défi.

Nous posons les bases conceptuelles d'un dispositif visant à bancariser des données riches issues d'opérations de prélèvement d'échantillons géologiques de type « carottes ». Nous insisterons notamment sur l'articulation de cette base avec des systèmes tiers et montrerons que la collecte de données de terrain offre un socle fondamental pour bancariser ultérieurement toutes les données acquises sur ces échantillons.

Nous insisterons sur la présentation opérationnelle des deux outils actuellement disponibles :

i) CoreBook, une application Android dédiée à la capture des informations de carottage et ii) Cyber-carothèque nationale, à la fois entrepôt de données, visualiseur et distributeur de données et outil de recherche. Ces outils fonctionnent quel que soit l'opérateur institutionnel de terrain : labos, Flotte Océanographique Française, partenaires étrangers, ou encore prestataires privés.

Nous insisterons enfin sur les aspects d'interopérabilité, notamment avec le système d'identification IGSN. Ces outils et l'effort consenti par notre consortium s'inscrivent ainsi dans l'effort mondial pour la bancarisation des données et contre la crise de la reproductibilité.

Mots-Clés : Carottages scientifiques ; Métadonnées de terrain ; Échantillons ; FAIR ; IGSN ; CoreBook ; Cyber-carothèque nationale



La datation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ des minéraux argileux : un outil pour l'étude des processus Basse-Température - applications aux enjeux sociétaux critiques.

Julia Ricci ^{*1}, Philippe Münch¹, Patrick Monié ¹, Patricia Patrier ², Daniel Beaufort²,
Martine Buatier³, Delphine Charpentier³, Xavier Quidelleur⁴, Anthony
Hildenbrand⁴, Thierry Allard⁵

¹ Géosciences Montpellier – UMR CNRS 5243, Université de Montpellier – Université des Antilles– France

² Institut IC2MP – UMR CNRS 7285, Université de Poitiers – France

³ Chronoenvironnement - UMR CNRS 6249, Université de Besançon – France

⁴ GEOPS, UMR8148, Université Paris-Saclay – France

⁵ IMPMC, UMR CNRS 7590, Sorbonne Université, MNHN, IRD, Paris – France

Pour comprendre les processus géodynamiques de (sub-)surface qui ont marqué l'histoire de la Terre et leurs implications géologiques, il est nécessaire d'établir des contraintes géochronologiques précises. Les minéraux argileux, ubiquistes dans ces domaines, présentent une grande variabilité chimique et minéralogique en fonction de leur environnement de formation ce qui en fait d'excellents marqueurs des processus qui ont accompagné leur évolution. Cependant, l'application des méthodes géochronologiques aux processus de basse-température est encore peu développée, notamment parce que la datation K-Ar et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ des minéraux argileux demande encore à lever de nombreux verrous, en raison de leur complexité physico-chimique et d'inconvénients analytiques inhérents aux méthodes utilisées.

Nous présentons ici les premiers résultats obtenus au cours du projet actuellement développé au laboratoire Géosciences Montpellier en collaboration avec de nombreux partenaires, spécialistes de la minéralogie des argiles, projet qui s'attache à mettre en œuvre une méthode fiable et polyvalente de datation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ des minéraux argileux. La datation des premiers échantillons, initialement analysés en K-Ar, a conduit à une comparaison et une intercalibration des deux techniques pour des environnements géologiques variés (e.g. gisements hydrothermaux, gouges de faille, circulations hydrothermales, diagenèse). Elle a mis en évidence la polyvalence et la précision de la technique, permettant de dater avec succès la néoformation des minéraux argileux. Elle a permis de révéler la coexistence de réservoirs multiples d'argon au sein des populations argileuses, indétectable par la méthode K-Ar. L'intercalibration des deux techniques par des méthodes indépendantes de la désintégration du ^{40}K (ESR, Rb-Sr) fait également partie du projet.

Ces premiers résultats très encourageants soulignent l'importance du développement de la datation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ des minéraux argileux, technique qui pourra être appliquée à des sujets de première importance tels que le risque tectonique, l'évolution des paléo-surfaces et des conditions paléo-climatiques, ou encore les ressources naturelles.

Mots-Clés : Géochronologie ; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$; minéraux argileux ; tectonique ; ressources ; surface ; paleo-environnement.



T18.4 RGF (Chantier Alpes et bassins périphériques) (BRGM) et Alpararray (INSU)



Crustal shortening and structural inheritance in the superimposed Pyrenean-Provence and Subalpine foreland thrust wedges

Jocelyn Balansa¹, Nicolas Espurt^{1*}, Jean-Claude Hippolyte¹, Séverine Caritg-Monnot²

¹ CEREGE – Aix-Marseille Université – France

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

Deciphering how crustal shortening is accommodated in fold-thrust belts is a major issue for understanding the spatial and temporal evolution of orogenic systems. In this study, structural data, syn-orogenic sediments, fault slip analysis, and the construction of a 150 km-long sequentially restored balanced cross section across the upper Cretaceous-Eocene Arc-Rians and Neogene Valensole foreland basins have been used to reconstruct the history of thrust propagation and crustal shortening in the superimposed Pyrenean-Provence and southwestern Subalpine fold-thrust belts. Although the Pyrenean-Provence and Subalpine fold-thrust belts grew at different geological times and durations (Latest Santonian-Campanian to Eocene, i.e., 50 m.y. for the Pyrenean-Provence compression; Oligocene to present, i.e., ~28 m.y. for the Subalpine compression) and with opposite vergences, our evolutionary tectonic model shows that the structure and kinematics of both thrust wedges are closely similar: inner basement-cover thrust sheets inverting rift system and early halokinetic structures (inversion of Beausset basin for the Pyrenean-Provence compression, and Digne-Barles basin for the Subalpine compression), establishment of a foreland basin system (Arc-Rians and Valensole, respectively) associated with the propagation of the deformation toward the foreland, and late distal basement-involved shortening related to far-field transmission of the contractional stress. We conclude that the vertical partitioning of the shortening has been strongly influenced by a pre-existing large-scale extensional structural arrangement of the basement established during the Late Paleozoic to the Mid Cretaceous, the Valensole horst, and by other factors as compressional inheritances (such as Variscan foliation and Pyrenean-Provence thrusts), nature and spatial distribution of the Triassic décollement level and pre-existing halokinetic structures, and syn-orogenic sedimentation.

Mots-Clés : Pyrenean-Provence; Subalpine; Balanced cross section; Structural inheritance



Paleothermal history of the Digne and Embrunais-Ubaye thrust sheets in the southwestern Alps

Jocelyn Balansa ^{1*}, Nicolas Espurt ¹, Jean-Claude Hippolyte ¹, Abdeltif Lahfid ², Séverine Caritg ²

¹ CEREGE – Aix Marseille Université – France

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

Constraining the thermal history of mountain chains is a major challenge for understanding tectonic mechanisms and timing of deformation of orogens. Whereas many Alpine domains have been studied in this way, very few data exist for the French southern Alps. The sedimentary pile of the Digne thrust sheet is characterized by a major schistosity and an anchizone-type metamorphism up to the Eocene-Oligocene Annot sandstones, accompanied by important fluid circulations. To obtain a regional view of temperature peaks and their distribution in the Digne and Embrunais-Ubaye thrust sheets, we performed a paleo-thermicity analysis by RAMAN spectroscopy on the carbonaceous material (RSCM) in Triassic to Eocene-Oligocene sedimentary rocks. The rocks recorded temperature peaks between 260 and 350°C. The Annot sandstones recorded temperature peak of ~300°C. In contrast, Miocene deposits of the Valensole foreland basin have not recorded major heating. Cross section construction suggests that the recorded high temperatures cannot be only explained by sedimentary burial associated with the tectonic stacking of Embrunais-Ubaye thrust sheets. Sedimentation of the Annot sandstones occurred in a strongly subsident foreland basin with synchronous extensional structures. Recent tomographic models suggest mantle flow related to subduction and/or to the propagation of the front of the orogen. Our new temperature peaks data support such models in the southern Alps. We propose a geodynamic model where the thermal history of the Digne and Embrunais-Ubaye thrust sheets was controlled by an Eocene-Oligocene asthenospheric flow, caused by the mantellic suction of the Appenninic slab-retreat. During this process, the deposition of thick syn- orogenic Eocene-Oligocene strata together with the tectonic covering of the inner thrust sheets detached above Triassic evaporites might have acted as a thermal insulator.

Mots-Clés: Orogen, Southwestern Alps, Paleothermicity, RSCM



Structuration des massifs subalpins, datation de la mise en place par U-Pb sur calcite

Dorian Bienvegnant^{*2}, Antonin Bilau^{*1,2}, Yann Rolland^{1,2}, Stéphane Schwartz², Nicolas Godeau³, Abel Guihou³, Pierre Deschamps³, Louise Boschetti^{1,2}, Xavier Mangenot⁴, Benjamin Brigaud⁵, Thierry Dumont².

¹ EDYTEM - Université Savoie Mont Blanc - CNRS - UMR - Bourget du Lac, France.

² ISTerre - Université Grenoble Alpes - Univ. Savoie Mont Blanc - CNRS - IRD - IFSTTAR – Grenoble, France.

³ CEREGE - Aix-Marseille Université - CNRS - IRD - INRAE - Collège de France - Aix en Provence, France.

⁴ Caltech - Geological and Planetary Sciences - Pasadena, CA, USA.

⁵ GEOPS – CNRS - Université Paris-Saclay - Orsay, France.

Les massifs sédimentaires subalpins du Vercors et de la Chartreuse sont structurés par une tectonique de couverture de type fold and thrust belt, avec des chevauchements des séries carbonatées du Jurassique/Crétacé sur des bassins molassiques miocènes (e.g., Debelmas, 1966 ; Deville, 2021). L'âge de mise en place de ces chevauchements était jusqu'à présent contraint de manière indirecte par l'âge des molasses chevauchées. Trois chevauchements principaux sont identifiés dans ces deux massifs mais leur continuité reste discutée.

La méthode de datation U-Pb sur calcite a été appliquée à des échantillons collectés sur les plans de faille et dans les galets fracturés de la molasse conglomératique sous les chevauchements. Douze nouveaux âges absolus répartis entre ces différents chevauchements permettent de discuter de leur chronologie de mise en place. La mise en place du chevauchement le plus oriental du Vercors (chevauchement du Moucherotte) est datée à $\sim 15.2 \pm 0.9$ Ma. Concernant les autres chevauchements, des âges significativement plus jeunes, 12.7 ± 0.8 Ma et 12.2 ± 0.3 Ma sont enregistrés.

À la vue de ces nouvelles données, nous proposons que le chevauchement du Moucherotte (Vercors) soit une klippe ne se rattachant pas au chevauchement du Néron en Chartreuse. Les autres chevauchements se mettent en place dans une fourchette de temps très courte (< 1 Ma). En compléments des âges les plus vieux attribués à la mise en place de ces structures, quelques âges plus jeunes (notamment 9.5 ± 0.9 Ma, 6.5 ± 0.8 Ma, 3.9 ± 0.3 Ma) ont été enregistrés sur l'ensemble des chevauchements, mais de façon plus marquée à l'Est des massifs. Ces âges plus jeunes sont interprétés comme des réactivations hors-séquence de ces structures, pouvant accompagner l'exhumation des Massifs Cristallins Externes. Ces âges sont à replacer dans un contexte de déformation à l'échelle du prisme orogénique.

Mots-Clés : Datations, Failles, U-Pb calcite, Massifs subalpin, Vercors, Chartreuse, Tectonique de couverture.



Datation des phases critiques de fracturation et caractérisation des fluides au cours de l'évolution du prisme alpin

Antonin Bilau^{*1,2}, Yann Rolland^{1,2}, Stéphane Schwartz², Nicolas Godeau³, Abel Guihou³, Pierre Deschamps³, Cécile Gautheron⁴, Rosella Pinna-Jamme⁴, Xavier Mangenot⁵, Benjamin Brigaud⁴, Aurélie Noret⁴, Thierry Dumont².

¹ EDYTEM - Université Savoie Mont Blanc - CNRS - UMR - Bourget du Lac, France.

² ISTerre - Université Grenoble Alpes - Univ. Savoie Mont Blanc - CNRS - IRD - IFSTTAR – Grenoble, France.

³ CEREGE - Aix-Marseille Université - CNRS - IRD - INRAE - Collège de France - Aix en Provence, France.

⁴ GEOPS – CNRS - Université Paris-Saclay - Orsay, France.

⁵ Caltech - Geological and Planetary Sciences - Pasadena, CA, USA.

Dans les Alpes occidentales, le Front Pennique (FP) représente une structure tectonique majeure d'échelle crustale résultant de la collision. Le jeu compressif de cette faille pendant l'Oligocène (Simon-Labrie et al., 2009) a transporté les unités internes ayant subi un métamorphisme de haute pression (à l'Est) sur la couverture sédimentaire Mésozoïque- Paléozoïque faiblement métamorphisée (à l'Ouest).

Les travaux sismo-tectoniques effectués dans cette zone (Sue et al., 1999) mettent en évidence une activité extensive et transtensive s'exprimant au travers du faisceau de failles de la Haute-Durance reliée au rejeu en extension du FP. Des datations U-Pb sur calcite (Bilau et al., 2021) dans des brèches de failles ainsi que (U-Th-Sm)/He sur un plan de faille à hématite ont été effectuées afin d'apporter des contraintes temporelles directes sur l'inversion du FP. Six âges U-Pb sur calcite entre 5.3 ± 0.6 Ma et 2.3 ± 0.2 Ma (2σ) ont été obtenus sur le ciment de gouge de failles normales. Quarante-huit aliquotes d'hématites ont été datés et présentent des âges allant de 2.4 ± 0.1 Ma à 0.3 ± 0.1 Ma (1σ).

Cette diversité est interprétée comme une activité plus ou moins continue au cours des derniers 5 Ma. Les structures échantillonnées sont des marqueurs de la paléosismicité qui s'est décalée vers l'Est, de façon relative, tandis que le prisme orogénique se propage vers l'Ouest sur l'avant-Pays.

L'étude des isotopes stables du $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$ de la calcite des failles apporte des contraintes sur l'origine des fluides. Les structures compressives et extensives précoces de petite taille (fentes en échelon décimétriques) ont une signature similaire à leur encaissant interprétée comme un système fermé à l'équilibre. En revanche, les structures extensives tardives (cataclasites métriques) présentent des valeurs $\delta^{18}\text{O}$ faibles associées à des fluides métamorphiques. Aussi, nous suggérons que les failles normales de la Haute-Durance mobilisent des fluides profonds en se branchant sur le FP.

Mots-Clés : Datations, Failles, Inversion Front Pennique, U-Pb calcite, (U-Th-Sm)/He hématite, Isotopie stable, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$.



Temps longs et temps courts des instabilités gravitaires profondes : contribution à la connaissance des phénomènes pour la gestion de l'aléa en montagne alpine.

C. Boivin ^{*a}, J.P. Malet ^a, C. Bertrand ^b, Y. Thiery ^d, J. van der Woerd ^a, F.Lacquement ^d

^a Institut Terre et Environnement de Strasbourg – IPGS/DA - UMR 7516 CNRS-Unistra ;

^b Laboratoire ChronoEnvironnement – LCE / UMR 6249 CNRS – UFC ;

^c Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg – BISE / UMR 7517 – Unistra ;

^d Bureau de Recherches Géologiques et Minières

Les Deep Seated Gravitational Slope Deformation (DSGSD) se définissent comme un ensemble de massifs rocheux caractérisés par un mouvement généralement lent et pouvant affecter tous les versants d'une vallée ou d'une chaîne de montagnes (Agliardi et al., 2001, 2009 ; Panek et Klimes., 2016). Cette instabilité profonde est identifiée dans de nombreux cas comme la zone d'origine d'autres aléas naturels importants comme les glissements de terrain : exemple du glissement de terrain de La Clapière dans les Alpes Maritimes (BigotCormier et al., 2005). Les DSGSD représentent un objet important que nous devons comprendre afin d'anticiper tous aléas gravitaires leurs étant associés. En effet, de nombreux facteurs qui pourraient être à l'origine ou contrôlant l'évolution des DSGSD ont été identifiés comme par exemple l'héritage structural, le climat ou l'activité tectonique (Agliardi 2000 ; 2009 ; 2013 ; Jomard 2006 ; Sanchez et al., 2009 ; Zorzi et al., 2013 ; Panek et Klimes., 2016 ; Ostermann et Sanders., 2017 ; Blondeau 2018). L'évolution à long terme et à court terme des DSGSD est encore mal connue mais représente un point important pour prédire le niveau de risque de chacun d'entre eux. C'est dans le but de mieux comprendre l'évolution à court terme (<100 ans) et à long terme(>100 ans) des DSGSD des massifs alpins français et le lien avec l'occurrence des glissements de terrain, que ce projet de thèse est développé. L'objectif principal de ce projet, est de proposer des modèles d'évolution du DSGSD définissant des clés d'interprétations afin de comprendre l'évolution future des déformations et de localiser les zones susceptibles d'initier d'autres aléas. La zone d'étude du Queyras dans les massifs alpins français a été choisie car elle représente une zone de lacunes d'étude des DSGSD. Cette zone présente également l'avantage d'avoir une faible diversité lithologique permettant de simplifier l'identification des facteurs influençant l'évolution des DSGSD. Une analyse géomorphologique sur données satellitaires et au sol est réalisée pour localiser les DSGSD et caractériser leur structure. Plusieurs datations (¹⁴C, ¹⁰Be ou ³⁶Cl) seront réalisées pour reconstituer l'histoire de ces objets et comprendre les facteurs qui ont contrôlés leurs évolutions. Grâce à la photo- interprétation des données satellites et aériennes, 30 DSGSD ont été identifiés dans le secteur du Queyras. Ces 30 objets ont été reconnus par l'utilisation d'un ensemble de 6 morphologies couramment rencontrées dans les DSGSD et définies et synthétisées par de nombreux auteurs (Agliardi et al., 2001, 2009, 2013 ; Panek et Klimes., 2016 ; Crosta et al., 2013 ; Blondeau 2018 ; Zorzi et al., 2013 ; Sanchez et al., 2009 ; Gutiérrez-Santolalla et al., 2005 ; Hippolyte et al., 2006, 2009, 2012.). D'autre part, une sélection de 8 objets représentatifs des DSGSD du Queyras a été faite pour la réalisation d'études cartographiques, structurels et de l'évolution de la déformation plus précises. Ces dernières sont complétées par des données et observations issue de trois périodes de terrain dont la synthèse est en cours d'élaboration.

Mots-Clés : Géomorphologie , DSGSD, glissement de terrain, Alpes, Aléa, RGF



Structure du bassin Ligure : apport de l'exploitation conjointe des données OBS et MSC de la campagne SEFASILS

Albane Canva^{1*}, Jean-Xavier Dessa¹, Alessandra Ribodetti¹, Marie-Odile Beslier¹, LaureSchenini¹, Isabelle Thinon², Nicolas Chamot-Rooke³, Matthias Delescluse³, Jacques Déverchère⁴ et Christophe Larroque¹

¹ GéoAzur – Université Côte d'Azur, Sorbonne Université, CNRS, IRD, Observatoire de la côte d'Azur - France

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

³ Laboratoire de Géologie, Ecole Normale Supérieure, Université PSL, CNRS - France

⁴ Univ. Brest, CNRS, Laboratoire Géosciences Océan – France

Le bassin Ligure, à la jonction entre la mer Méditerranée occidentale et la chaîne Alpine, résulte d'une extension arrière-arc liée au retrait de la plaque plongeante Ionienne depuis l'Oligocène jusqu'au Miocène. Cette phase d'extension prenant place dans le contexte de la collision Eurasie-Afrique a créé des structures complexes dans une lithosphère déjà hétérogène.

La sismicité actuellement enregistrée dans le domaine oriental du bassin Ligure résulte d'un régime tectonique compressif initié il y a environ 5 Ma mettant en inversion la marge Nord Ligure. Le soulèvement de la marge de plus de 1000 m a été mis en évidence via des données de sismique réflexion haute résolution existantes au niveau du promontoire d'Imperia, démontrant aussi l'existence d'un réseau de failles au pied de la pente continentale. Un autre réseau de faille est suspecté au cœur du bassin sous des structures salifères proéminentes. Les géométries profondes de ces structures actives à l'origine de ces séismes et du soulèvement de la marge sont encore peu connues.

L'objectif de la campagne SEFASILS est d'explorer la structuration profonde du bassin Ligure et de sa marge continentale Nord pour préciser les modalités de formation du bassin en contexte arrière-arc, et de son inversion structurale récente ainsi que de mieux caractériser la transition Alpes-Méditerranée. L'importante épaisseur d'évaporites messiniennes incluses dans la couverture sédimentaire restreint l'observation des structures en profondeur. L'exploitation couplée des données de sismiques réflexion multitrace (MCS) et grand angle (WAS) acquises le long d'un même profil perpendiculaire à l'axe du bassin permet d'améliorer l'image de la structuration profonde du bassin Ligure et de sa marge continentale Nord.

L'interprétation conjointe des migrations pré et post-stack des données MCS avec le modèle de vitesse issu de l'inversion tomographique des temps de premières arrivées des données WAS mène à distinguer la croûte continentale amincie de la marge nord-ligure, et deux domaines distincts dans le bassin profond où la croûte sismique est mince (domaine II, transitionnel) voire inexistante (domaine III, central). Dans ce domaine central, les profils de vitesse ainsi que l'étude des réfléchies du manteau sur les données WAS suggèrent fortement que la couverture sédimentaire repose sur du manteau exhumé peu ou partiellement serpentinisé, confirmant que la rupture continentale a été atteinte lors du rifting du bassin. Sur ce segment d'étude, où l'inversion structurale n'est pas la mieux exprimée dans sa morphologie (à la différence de la zone d'Imperia à l'Est), il est cependant possible d'en observer des marqueurs indirects.

Mots-Clés : Méditerranée, marge Ligure, inversion, sismique grand angle, sismique multi-trace



Fluvial bedrock gorges as markers for Late-Quaternary tectonic and climatic forcing in the French Southwestern Alps

Thibaut Cardinal^{1,*}, Yann Rolland^{2,3}, Carole Petit¹, Laurence Audin², Swann Zerathe², Stéphane Schwartz², Pierre G. Valla^{2,4}, Régis Braucher⁵, and ASTER team^{5,**}

¹ Géoazur, University Côte d'Azur - France

² ISTerre, University Grenoble Alpes - France

³ Edytem, University Savoie Mont Blanc – France

⁴ University of Bern, Institute of Geological Sciences - Switzerland

⁵ CEREGE – France

****** ASTER Team: Georges Aumaître, Didier L. Bourlès, Karim Keddadouche

Fluvial incision is the consequence of landscape readjustment to combined tectonic and climatic processes. In the Southwestern Alps, deep gorges incised by rivers attest of efficient erosional processes at the front of the Alpine mountain range. We measured in situ- produced ³⁶Cl concentrations along the fluvially-polished bedrock walls of the Péroure and Bévéra river gorges, which are located in the external SW French Alps. Both catchments lie beyond the previously glaciated domain during the last glacial periods, which makes them suitable to quantify fluvial incision dynamics in a non-glacial environment. Our cosmic-ray exposure (CRE) dating results provide a mean incision rate of 0.6-0.7 mm/yr over the last 20 ka. Compared to CRE dating data obtained from previous studies in neighboring catchments, we highlight three different incision dynamics for bedrock gorges in SW Alps: (i) Group A with slow and steady incision rates (0.5 mm/yr over the last ca. 30 ka), comparable to long-term denudation and rock-uplift rates in the area, suggesting tectonic forcing for incision in non-glaciated zones; (ii) Group B showing high incision rates (≈ 2 mm/yr) during the paraglacial period after the Last Glacial Maximum (LGM, ca. 20 ka), possibly related to an increase in sediment yield and water runoff following glacier retreat; (iii) Group C with high (≈ 5 mm/yr) and recent (post-10 ka) incision rates that reflect fluvial rejuvenation of glaciated catchments.

Mots-Clés : Southwestern Alps, mountain gorges, fluvial incision, ³⁶Cl CRE dating



The Albo-Cenomanian paleogeography of Haute-Provence: a crucial geological record of the South-East France Basin

Claude Colombié^{*1}, Fabienne Giraud², Matthias Bernet², Thomas Blaise³,
Nicolas Espurt⁴, Philippe-Hervé Leloup¹, Emmanuel Masini², Stéphane Reboulet¹

¹ Laboratoire de Géologie de Lyon : Terre, Planètes, Environnement (LGL-TPE) – CNRS : UMR5276 – Université Claude Bernard Lyon 1 – France

² Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) – CNRS : UMR5275 – Université de Grenoble Alpes – France

³ Géosciences Paris-Saclay (GEOPS) – CNRS : UMR8148 – Université Paris-Saclay – France

⁴ Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE) – CNRS : UMR7330 – Université Aix-Marseille – France

Located at the Pyrenees-Alps linking zone, the SE Basin is a key area to better understand the role of structural inheritance in the formation of the SW Alps fold and thrust belt and foreland basin. The Albo-Cenomanian interval is marked by the "Durancian uplift" formation in Haute-Provence and by the Mid-Cenomanian Event (i.e. a major disruption of the carbon cycle). Recently, our very detailed sedimentological and stratigraphical analyses and correlation of 5 Cenomanian sections have shown important variations of facies and thickness, which suggest a significant tectonic control on subsidence and sedimentation that might be due to crustal deformation and/or halokinetic motions. Each section belongs to different paleoblocks bounded by Jurassic and Cretaceous normal faults of N-S orientation. From our dataset, we show that the differential vertical motions of these paleoblocks mimics a west-to-east spatiotemporal migration of a long-wave deformation over an interval of only 2 Ma during the early Cenomanian. This migration might be related to an active tectonic phase that could be laterally synchronous with the Pyrenean rifting and whose mechanism (either extension or compression) is still debated despite its importance for the kinematics of regional plates.

This is what our project is aiming to answer by unraveling a more detailed pre-alpine paleogeography in the Haute-Provence area. This will be done by characterizing and dating the Albo-Cenomanian tectonic and paleoenvironmental events. It will combine very detailed sedimentological and stratigraphic analyses of sections further constrained by subsurface boreholes with thorough structural analysis. Notably, U/Pb dating on calcite-mineralized faults will enable to identify active fault systems. All these results will be used for a 3D subsidence analysis and structural restorations. This multi-method approach aims at delivering paleogeographic reconstructions of unprecedented accuracy (i.e. 100 kyrs) that are essential to precise the nature, geometry, kinematic (either extensional or compressional) for the poorly documented Albo-Cenomanian period within the Haute-Provence area. Replaced in its geodynamic context, this crucial geological record may provide new keys to assess the still disputed Pyrenean-Alpine linking zone.

Keywords: high-resolution paleogeography, "Durancian uplift", Albo-Cenomanian, Pyrenean-Alpine kinematics

^{*}Intervenant



Western Alps Early Cretaceous Accretionary Complex of the Valaisan ocean.

Gilles De Broucker ^{*1}, Yves Siméon ², Gérard M. Stampfli ³, Denis Thiéblemont ⁴,

Philippe Lach ⁴, Michel Marthaler ⁵, Pierre Antoine ⁶

¹ Retraité Shell International, France,

² Retraité BRGM, France,

³ Emerit Professor UNIL, Suisse.

⁴ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), France,

⁵ Emerit Professor UNIL, Suisse

⁶ Emerit Professor, Université Grenoble-Alpes, France

Based on detailed field investigations and structural mapping in the Petit-Saint Bernard Pass area (French-Italian border), the Versoyen Complex is newly defined as an imbrication of four structural units : one, the remnant of the Valaisan ocean floor (basalt and black schist unit) and three subunits of “schistes à blocs” differentiated on the origin of their blocks: oceanic, continental or a mix of both, embedded in a matrix of grey micaschists. The Valaisan rift breakup started during the Tithonian, when Spain drifted away from Newfoundland and the North-Atlantic opened. The rift propagated eastwards in the Alpine region through pre- existing Variscan structures such as the Zone Houillère separating the Briançonnais domain from the External Crystalline Massifs. The Subbriançonnais domain became the northwestern Briançonnais passive margin in this process. The Versoyen Complex was initially part of this Valaisan extended margin characterised by Briançonnais basement rift allochtons. Due to the southward subduction of the Valaisan Ocean, this passive margin was later on deformed through intense compressional shearing tectonics, developing a schistes à blocs fabric, and a large-scale imbrication of the former allochtons. Radiolarians found within the Versoyen grey micaschists have been attributed to the Late Jurassic, Middle Cretaceous epoch. Additional stratigraphic and geodynamic constraints allow us to restrict the grey micaschists deposition from the Aptian to Cenomanian times. We interpret the Versoyen Complex, in its current outcropping structural configuration, as a pre-alpine Cretaceous tectonic mélange, representing a subduction accretionary prism, formed during the closure of the Valaisan Ocean. The Paleozoic continental basement rocks of the Versoyen Complex tectonic mélange, initially rift allochtons, are now outcropping as blocks and slivers within an Early Cretaceous grey micaschists matrix. A geochemical and U/Pb dating review at the scale of the Western Alps shows that all these rocks are part of the Briançonnais continental basement corresponding to a late Variscan back-arc environment. A new geodynamic model for the evolution of the Valaisan Ocean is proposed based on all the field observations in the Petit-Saint-Bernard Pass area and on the Alpine plate tectonic reconstructions at the scale of the larger western Tethyan domain. The understanding of the fascinating geology around the Petit-Saint-Bernard Pass remains and will continue to remain a key area to unravel the geodynamic evolution of the Western Alps.

Mots-Clés : Valaisan ocean, Versoyen Complex, accretionary prism, tectonic mélange, radiolarians, geochemistry, U/Pb dating, Briançonnais, Petit-Saint-Bernard Pass.



Tectonique dans le bassin d'avant pays subalpin de Haute Provence : nouvelle vision 3D du Vélodrome par une approche de modélisation géométrique 3D

Agathe Faure^{*1}, Laurent Jolivet¹, Cécile Allanic², Charles Gumiaux³, Gautier Laurent³,
Nicolas Loget¹, Jean-Paul Callot⁴, Nicolas Bellahsen¹, Myette Guimard⁵

¹ Sorbonne Université, CNRS-INSU, Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP), UMR 7193 - France

² Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

³ Université d'Orléans, CNRS-INSU, Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO), UMR 7327 - France

⁴ E2S UPPA CNRS/TOTAL/Univ Pau & Pays Adour, Laboratoire Des Fluides Complexes Et Leurs

Reservoirs-IPRA, UMR5150 - France

⁵ Réserve Naturelle Nationale Géologique de Haute Provence (RNNGHP) – France

Au front de la nappe de Digne, l'avant chaîne déformée affleurant spectaculairement bien au niveau de la demi-fenêtre de Barles présente des géométries complexes dont l'origine reste en grande partie inconnue. Cette complexité est notamment liée à l'histoire polyphasée de cette zone qui a enregistré des déformations syn-sédimentaires, une possible migration du front alpin, une exhumation tardive ainsi qu'une possible tectonique salifère. Les rôles respectifs de chacun de ces épisodes, bien que marqués et préservés sur le terrain, restent difficiles à évaluer du fait notamment de géométries non cylindriques et parfois difficiles à restituer en 2D. Le synclinal du Vélodrome au sud de la fenêtre de Barles en est un exemple. En effet, les séries de molasses marines et de conglomérats mio-pliocènes forment un synclinal renversé vers le sud dont l'axe principalement WNW-ESE est arqué et lui confère ainsi une forme ellipsoïdale. Si la stratigraphie des séries tertiaires est bien connue, la mise en place des structures qu'elles dessinent reste débattue. L'observation de discordances progressives au sein des séries plissées a permis d'interpréter cette structure comme un pli de croissance syn-sédimentaire (Gigot et al., 1974, Gidon et Pairis, 1992). Cependant, Fournier et al. (2008), n'observant pas de discordance progressive suggèrent que le plissement du Vélodrome est postérieur au dépôt des sédiments et a lieu pendant la mise en place de la nappe. Enfin, Graham et al. (2012) proposent d'expliquer la forme spectaculaire du Vélodrome et ses discordances progressives par l'action de la tectonique salifère. Afin de proposer un modèle cohérent, il apparaît donc nécessaire d'intégrer l'ensemble des géométries de cette structure dans un espace tridimensionnel. Nous présentons ici les résultats préliminaires d'un modèle géométrique 3D du Vélodrome obtenu avec le GeoModeller (©BRGM). Cette modélisation géométrique essentiellement basée sur des données de terrain permet d'évaluer la part respective des processus tectoniques, sédimentaires ou salifères responsables des géométries observées et d'apporter une nouvelle vision sur une des structures phares du patrimoine géologique français.

Mots-Clés : Alpes de Haute Provence, Vélodrome, bassin d'avant-pays, Modélisation 3D, tectonique salifère





Quantification of seismic strain rates in the tectonic transfer area from the Alps to the French Rhone valley

Estelle Hannouz^{*1}, Christian Sue^{1,2}, Andrea Walpersdorf¹, Stéphane Baize³,
Stéphane Mazzotti⁴, Anne Lemoine⁵, Marguerite Mathey¹

¹ Institut des sciences de la Terre (ISTerre), Grenoble – France

² Chrono-Environnement, Besançon – France

³ Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) – France

⁴ Géosciences Montpellier – France

⁵ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

The center and borders of the Western Alps show significant recent deformations: radial extension combined with an important phenomenon of uplift in the center and transpressive deformations in borders. The region of the Rhone Valley and the alpine foreland that surround this area, have high societal challenges (demography, nuclear and chemical industry). In our study, we want to see how the transfer of active tectonics is translated from the Western Alps to the Rhone Valley and the alpine foreland in terms of stresses and seismic deformations.

The Rhone Valley region, however, remains poorly resolved in seismic data (e.g. only few focal mechanisms). It is for this reason that we use a new method of strain rate calculation adapted to our area: to combine the total energy obtained with a statistical integration of a Gutenberg-Richter distribution with an average mechanism calculated from a stress inversion. This method allows us to compute seismic strain rate tensors. We finally compare our results with those obtained by geodesy.

We thus obtain slow deformation rates in the Rhone Valley. Seismic strain rates range between a few nanostrains/yr and $10E-2$ nanostrains/yr according to the different zones discretized by our seismotectonic zoning. In terms of amplitude, geodesy delivers ten times higher deformation rates than seismicity in the region. On the other hand, our seismic strain tensors are consistent with geodesy in the Belledonne region only, where seismic and geodetic networks are well constrained. In the other seismotectonic zones, our results provide discrepancies with geodesy. We discuss here the differences observed in each subarea.

Mots-Clés : Seismotectonic – Active tectonic – French Alps

*Intervenant



Chemins d'exhumation contrastés des éclogites et granulites HP varisques dans les massifs de Belledonne et de l'Oisans–Pelvoux (Alpes occidentales)

*Jean-Baptiste Jacob¹, Stéphane Guillot¹, Emilie Janots¹, Daniela Rubatto²,
Jérémie Melleton³, Michel Faure⁴

¹Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, UGE, ISTerre, Grenoble, France

²University of Bern, Institute of Geological Sciences, Bern, Switzerland

³Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France

⁴Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, Université d'Orléans, CNRS, Orléans, France

Des reliques d'éclogites et de granulites de haute pression (HP) varisques affleurent dans les massifs cristallins externes (MCE) des Alpes occidentales. Dans le cadre du projet RGF Alpes, les formations métamorphiques des massifs de Belledonne et de l'Oisans–Pelvoux ont été ré-étudiées, menant à la découverte de nouvelles granulites HP. Deux reliques de HP ont été examinées en détail, dans le but de mieux contraindre leur évolution Pression- Température-temps (P-T-t), et de proposer un scénario géodynamique cohérent sur l'ensemble des MCE. Ces deux formations enregistrent une évolution prograde similaire, avec un pic de pression entre 1.4 et 1.8 GPa et 650–730 °C, et un âge contraint à 340–330 Ma (Viséen) par datations U-Pb sur rutile et zircon. En revanche, les chemins de décompression sont très contrastés entre les deux massifs : Dans le massif de Belledonne, les éclogites enregistrent une décompression isotherme à 750±30 °C et 0.8–1.2 GPa, associée à une paragenèse amphibolitique hydratée et une fabrique subverticale S2 mylonitique, suivie d'une rétrogression plus tardive dans le faciès des schistes verts. Dans le massif de l'Oisans–Pelvoux, les granulites HP enregistrent un premier stade d'exhumation dans le faciès amphibolite en conditions peu hydratées (750±30 °C ; 1.2–1.5 GPa), suivi d'un épisode HT à 800–880 °C et 0.85–1.0 GPa, marqué par une recristallisation statique des symplectites. Les âges U-Pb sur zircon datent l'exhumation entre 330 et 310 Ma. En Oisans–Pelvoux, le stade HT est probablement contemporain du pic de magmatisme granitique vers 305–298 Ma. Le stade HP Viséen (340–330 Ma) est contemporain d'une tectonique de nappes bien documentée dans le Sud du massif de Belledonne. Il est donc interprété comme le résultat de l'enfouissement d'unités crustales à environ 50–60 km de profondeur lors de la phase d'épaississement. Dans le massif de l'Oisans–Pelvoux, le stade HT marque un réchauffement bref de la croûte inférieure à la fin du Carbonifère, probablement lié à une remontée de l'asthénosphère sous la croûte orogénique. L'absence de ce métamorphisme HT tardif en Belledonne serait liée à une l'exhumation plus précoce des unités HP au cœur d'une zone de cisaillement dextre.



Vers un modèle intégré des données géophysiques et géologiques des Alpes occidentales : tomographie sismique de la lithosphère alpine par corrélation de bruit ambiant

Ahmed Nouibat ^{*1}, Romain Brossier ¹, Laurent Stehly ¹, Anne Paul ^{1,2}, Philippe Calcagno ³

¹ Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) - France

² Centre national de la recherche scientifique (CNRS) - France

³ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - France

Notre objectif de long terme est de contribuer à la construction d'un géomodèle des Alpes. Ici nous présentons un modèle 3-D de la vitesse des ondes S de la lithosphère alpine obtenu par tomographie de bruit sismique ambiant.

Pour ce faire, nous utilisons l'un des meilleurs jeux de données sismologiques disponibles aujourd'hui constitué de 4 ans d'enregistrements de plus de 900 stations permanentes européennes, des ~350 stations temporaires terrestres et fond de mer du projet européen AlpArray ainsi des ~110 stations des projets CIFALPS et CIFALPS2 (profils denses aux travers des Alpes occidentales).

Nous tirons profit de la qualité de ce jeu de données pour mettre en place une méthode innovante permettant de construire des cartes de vitesse de groupe probabiliste en 4s et 150s de période à partir d'une inversion 2-D Transdimensionnelle hiérarchique (Bodin et Sambridge, 2009). Pour tenir compte de la non-linéarité du problème inverse, nous avons combiné cette méthode avec la Fast Marching Methode (Rawlinson et Sambridge, 2005). Nous construisons le modèle Vs 3D probabiliste à partir des cartes de vitesse de groupe en inversant à chaque pixel la courbe de dispersion locale par une inversion Bayésienne. Un traitement spécifique a été appliqué sur les données brutes de fond de mer afin de supprimer les bruits océaniques et instrumentaux (Crawford et Webb, 2000).

Ce modèle sera utilisé pour modéliser la propagation des ondes de surface issues de corrélations de bruit et des ondes de volumes issues de séismes régionaux à partir des outils développés dans le cadre du consortium SEISCOPE. Ces modèles sismologiques serviront d'appuis pour produire un géomodèle 3D de référence à l'échelle des Alpes occidentales dans le cadre du chantier RGF, Alpes et bassins périphériques.

Mots-Clés : Alpes, tomographie, bruit ambiant



River incision, climate and vertical motions since the LGM in south-western Alps (France)

Petit Carole^{1*}, Rolland Yann², Braucher Régis³, Boulès Didier³, Cardinal Thibaut¹
et Audin Laurence⁴

¹ Géoazur, Université Côte d'Azur, CNRS, IRD, Observatoire de la Côte d'Azur, Valbonne, France
² EDYTEM, Université Savoie Mont-Blanc, CNRS, Le Bourget du Lac, France
³ CEREGE, CNRS, Aix-Marseille Université, Europôle de l'Arbois, Aix-en-Provence, France
⁴ ISTerre, IRD-CNRS-SUG, Université de Grenoble, France

In South-Western European Alps, although scarce, evidences of recent vertical motions suggest a slow (~ 0.1 mm/yr) uplift of the northern Ligurian margin, which increases towards to East from the Var river mouth to the gulf of Genova. Whether this uplift is due to active compressional tectonics, to isostatic rebound or to a combination of both is still unclear. In addition, because of the large topographic gradient, rivers have carved deep gorges in the bedrock of the SW subalpine chains. However, neither the role of vertical motion nor that of climatic changes since the LGM on river incision rates is well established.

Over the last 10 years, a dataset of ^{10}Be and ^{36}Cl based cosmic ray exposure (CRE) ages obtained on river and glacier polished surfaces in the SW French Alps has been gathered. This dataset covers several areas located in the Argentera crystalline massif, in the Nice and Castellane subalpine chains, and in the Provence domain.

We will present a compilation of these data in an attempt to answer the following questions: - what is the influence of the last glaciation on river incision rates? - Is there any evidence of a W-E gradient in incision rates that could reflect increasing uplift rates of the SW Alps and North Ligurian margin? First results tend to indicate that all river incision rates are remarkably similar since the Holocene glacial optimum, whereas two different tendencies arise before that time: catchments within the influence of Alpine glaciers tend to have larger incision rates during the last deglaciation, while at the same time catchments out of any glacial influence have slightly lower incision rates. This suggests that, at first order, the release of glacier meltwaters enhanced river incision rates downstream during the ~ 20 -12 ka period.

Mots-Clés : River incision, Southwestern Alps, Holocene, Cosmogenic nuclides dating



Apports des datations isotopiques Sr à la paléogéographie du bassin Miocène péréalpin français

Implications géodynamiques

Jean-Loup Rubino*¹, Amir Kalifi², Bastien Huet³, Albert Galy⁴ Bernard Pittet², Philippe Sorrel², Philippe-Hervé Leloup², Martine Bez¹, Philippe Crumeyrolle¹

1 TOTAL SA - Centre Scientifique et Technique Jean Féger (CSTJF) – TOTAL

– France2 Univ Lyon1, ENSL, CNRS, LGL-TPE, 69622 Villeurbanne, France

3 ISTEP- Sorbonne Université Paris Sorbonne, Paris, France

4 CRPG, 15 rue Notre Dames des Pauvres, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France.

Les séries molassiques marines miocènes du bassin péréalpin, en France comme en Suisse, sont difficiles à dater, notamment car ces séries sont à prédominance sableuse associée à de minces niveaux argileux déposés en milieu peu profond pauvres en foraminifères planctoniques. Les macro-fossiles y sont rares ou cassés en raison de l'hydrodynamisme et les échelles de référence sont très peu précises. Inversement, les séries continentales ont livré de nombreux gisements de micromammifères et l'on dispose aujourd'hui, pour l'intervalle régressif compris entre le Serravallien et le Messinien Inférieur, d'un canevas satisfaisant (Clauzon et al. 1990 ; Mein et al. 1999). Pour pallier cette lacune, certaines études ont opté pour l'utilisation de la magnétostratigraphie ; ici, nous avons privilégié les analyses isotopiques Sr, C et O afin de dater la partie transgressive du Miocène Inférieur. Cette méthode a fourni d'excellents résultats grâce aux 134 échantillons étudiés incluant plusieurs étapes de contrôle qualitatif rigoureux (notamment la cathodoluminescence).

La confirmation de l'existence de dépôts d'âges Aquitaniens et Burdigaliens inférieurs est attestée dans le Nord du bassin (sud du Jura, et Chartreuse) dans plus de 10 coupes sédimentologiques ; ces derniers résultats confirment ainsi ce qui est connu dans la littérature au SW du bassin molassique Suisse (BMS).

Comme on sait d'une part qu'au moins à l'Aquitaniens, la mer ne peut venir, (i) ni de la paratéthys au Nord (ex-BMS en partie), (ii) ni du Golfe du Lion au Sud-Ouest puisqu'elle reste confinée austroréennaise de Carry-le-Rouet (13) et à la Camargue, et que d'autre part, (iii) le seuil de Réauville, mettant en connexion le nord et le sud du sillon Rhodanien et le bassin molassique Suisse n'a été franchi qu'au Burdigalien Supérieur (Demarcq et al. 1989), il faut impérativement impliquer une autre voie pour que cette transgression atteigne le Nord du bassin. L'unique alternative possible se situe donc à l'Est, très probablement en position plus interne, proche du Front Pennique, et connecte le bassin Ligure, via le synclinal de Vence, et le Bassin de Digne avec la Chartreuse. Dans ces bassins, les datations biostratigraphiques et isotopiques sont robustes. Il reste néanmoins encore à trouver les jalons manquants dans le Dévoluy (?), ou impliquer une connexion transalpine avec le bassin Liguro-Piémontais (sauf si l'érosion n'a rien préservé). La paléogéographie aquitano-burdigalienne proposée rappelle celle des grès d'Annot à l'Ouest. Elle constitue un système intermédiaire entre le foredeep et le foreland le plus externe et témoigne d'une accélération de la géodynamique au Burdigalien sup. connue depuis la Provence jusqu'en Suisse et s'enregistrant aussi dans les chaînes subalpines septentrionales. Enfin, pour le Burdigalien inférieur, la paléogéographie reconstituée rappelle celle de Sissingh (2001), suggérant une connexion entre Gap et la Vallée du Rhône et les chaînes subalpines septentrionales via les synclinaux provençaux.

Mots-Clés : Isotopes Strontium, Alpes, Miocène, paléogéographie



Première occurrence de roches néoprotérozoïques dans les Alpes occidentales : les gneiss de Serre Chevalier (597 ± 4 Ma)

Denis Thiéblemont^{1*}, Philippe Lach¹, Jean-Baptiste Jacob², Catherine Guerrot¹

1 : Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

2 : Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, UGE, ISTerre, Grenoble, France

Des éléments de socle cristallin d'extension hectométrique à kilométrique affleurent au sein des unités mésozoïques à cénozoïques de la zone briançonnaise, à la latitude de la ville de Briançon. Ces éléments se retrouvent d'ouest en est dans l'ensemble de la zone, depuis les unités proches du front pennique jusqu'au contact avec le domaine liguro-piémontais.

Ces roches, uniformément cartographiées en micaschistes (ξ), présentent une forte variabilité de détail, incluant des orthogneiss, des metabasites, des métaconglomérats et des granitoïdes (Barfétty *et al.*, 1995). Dans le secteur de Serre-Chevalier, elles surmontent un complexe de flysch d'âge éocène moyen à oligocène inférieur, contenant des olistolithes et des brèches à éléments de socle cristallin.

Initialement considérée comme une écaille tectonique ("4^{ième} écaille"), cette unité a été ré-interprétée comme un olistostrome précédant les premiers stades orogéniques alpins (Barfétty *et al.*, 1992). L'hypothèse d'écaille est néanmoins maintenue sur la feuille Briançon avec mention d'un contact anormal "non observé" à sa base (Barfétty *et al.*, 1996).

Des datations U-Pb sur zircon ont été réalisées sur un échantillon de gneiss leptynique intercalé dans les micaschistes dominants. Par ailleurs, un échantillon de brèche permo-triasique (faciès "Verrucano") et de conglomérat de la série houillère (Pennsylvanien) ont été prélevés dans le soubassement briançonnais, afin de caractériser les populations de zircons détritiques.

Les gneiss leptyniques donnent un âge à 597 ± 4 Ma très bien défini, avec quelques zircons indiquant un héritage Paléoprotérozoïque ($\sim 2,1$ Ga). Les zircons extraits de la brèche permo-triasique définissent trois populations d'âges : Permien (295 ± 5 Ma), Tournaisien-Viséen (345 ± 5 Ma) et Ediacarien (563 ± 10 Ma). Les zircons extraits du conglomérat de la série houillère contiennent une population dominante d'âge Viséen-Tournaisien (338 ± 3 Ma), avec une population secondaire de zircons édiacariens (640-560 Ma).

Les gneiss de Serre-Chevalier constituent la première occurrence de roche néoprotérozoïque connue à ce jour dans les Alpes occidentales. Malgré la présence de zircons détritiques de cet âge dans le Carbonifère et Permien briançonnais, un réexamen structural est nécessaire pour déterminer l'origine exacte du socle de Serre-Chevalier.

Mots-Clés : Néoprotérozoïque, Alpes occidentales, Zone briançonnaise, Orthogneiss, Carbonifère, Verrucano



A reappraisal of the Variscan tectono-metamorphic evolution in the basement of the Aiguilles-Rouges massif (Alpine External Crystalline Massifs, France-Switzerland).

Vanardois Jonas^{1*}, Trap Pierre¹, Roger Françoise², Barou Fabrice², Lanari Pierre³, PhilippeGoncalves¹, Marquer Didier¹, Paquette Jean-Louis⁴, Fréville Kévin¹, Florence Cagnard⁵, LeBayon Benjamin⁵, Melleton Jérémie⁵.

¹UMR 6249 Chrono-environnement, Université de Bourgogne-Franche-Comté, France

²Géosciences Montpellier, Université Montpellier, CNRS,

France.³ Institute of Geological Sciences, University of

Bern, Switzerland ⁴ Laboratoire Magmas et Volcans

(CNRS-UMR 6524), France.

⁵ BRGM-French Geological Survey, France

The Aiguilles-Rouges Massif (ARM) basement is mostly composed of migmatitic gneisses and micaschists hosting metric boudins of retrograded eclogites and amphibolites. In the SW part of the massif, these high-grade rocks are overlaid by low-grade metamorphosed Carboniferous volcano-detritic sediments

Three main deformations, named D1, D2 and D3, have been described in the Variscan basement of the ARM. When D1 relicts are preserved in low-D2 strain domains, they correspond to a flat-lying S1 foliation only preserved in the gneissic core. This D1 is associated with partial melting metamorphic event M1. D2 is characterized by three main orientations of planar fabrics, oriented toward N160, N0 and N20 directions and forming S2-C2-C2' structures, respectively. They are related to a bulk non-coaxial anastomosed system developed under dextral transpression. D3 corresponds to a flat-lying cleavage associated to vertical shortening and folding of previous foliations. This deformation has only been observed in the upper structural levels of the gneissic basement and within the Visean sediments.

Field observations and EBSD data on eclogitic boudins indicate that D1 deformation is posterior to the relictual high pressure paragenesis, while D2 is synchronous with the retrogression of the eclogites into amphibolites. U-Th-Pb LA-IC-PMS datings on Zircon, Monazite and Rutile indicate that high-pressure metamorphism is recorded at ca. 335-330 Ma in the eclogitic boudins, whereas the M2 peak of temperature in surrounding metapelites ranges between 325 and 315 Ma. The exhumation of the Variscan basement, related to D2 dextral shearing and D3 crustal thinning, occurred between 315 and 300 Ma. These new results indicate a Variscan geodynamic evolution from high pressure conditions to late exhumation ranging between ca. 335 and 300 Ma in the ARM.

Mots-clés: Variscan orogen, External Crystalline Massifs, transpression, polyphase metamorphism, U-Th-Pb geochronology



Etude comparative de gîtes Pb-Zn-Ag le long d'un transect est-ouest des Alpes du Nord françaises

Maxime Bertauts ^{*1}, Emilie Janots ¹, Magali Rossi ²,
Isabelle Duhamel-Achin ³, Philippe Lach ³, Blandine Gourcerol ³

¹ ISTERre – Institut des Sciences de la Terre - France

² EDYTEM – Environnements DYNAMiques et TERRitoires de la Montagne – France

³ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

Les Alpes du Nord françaises recèlent environ 250 gîtes métalliques, essentiellement à métaux de bases : Pb-Zn-Ag (44%) et Fe-Cu (29%). Ces différents gîtes sont encaissés dans des domaines lithostructuraux variés, hérités de la complexité de l'histoire polyphasée alpine. Afin de mieux contraindre la dynamique des circulations de fluides à l'origine des minéralisations polymétalliques, un échantillonnage systématique des minéralisations a été réalisé le long d'un transect E-O qui traverse les grands domaines structuraux alpins depuis les massifs externes jusqu'au front houiller. Huit premiers sites ont été étudiés s'échelonnant sur 40 kilomètres de distance. Les 3 premiers sites sont localisés dans les Alpes internes : Macôt-La Plagne, Peisey-Nancroix (Briançonnais externe) et Pont-Saint-Antoine (Valaisan). Les 5 autres appartiennent aux massifs cristallins externes et sont localisés à proximité de leurs contacts avec leurs couvertures sédimentaires. Une étude de la géométrie des gisements et de leurs relations structurales avec les encaissants lithologiques a été menée systématiquement lorsque celle-ci était possible. Les minéralisations sont présentes au contact d'accidents majeurs. La morphologie des minéralisations est principalement en filon avec parfois la formation de lentilles et amas de sulfures massifs (Macôt-La Plagne et Peisey-Nancroix), ou sous la forme d'une matrice de brèche en zone mylonitique. La paragenèse des porteurs de la minéralisation reste cependant très similaire : galène, sphalérite, tétraédrite et chalcoppyrite avec une gangue principalement à quartz et phengite, plus ou moins barytine et carbonates.

Les premières datations isotopiques U-Pb réalisées *in situ* sur la monazite syngénétique à la galène des gisements Pb-Ag de Macôt-La Plagne et de Peisey-Nancroix, donnent des âges similaires autour de 34 Ma. Au vu de ces âges, ces deux minéralisations Pb-Ag apparaissent contemporaines de l'activité du front pennique. Pour la suite de cette thèse, nous proposons d'étendre les études géochronologiques ainsi que la caractérisation des inclusions fluides des minéraux de gangue et les éléments en traces dans les sulfures aux autres gisements, afin de comparer les modèles de circulations de fluides le long du transect investigué.

Mots-Clés : géologie, métallogénie, ressources, gisements, Alpes, métaux de bases, minéralogie, géochronologie.



**T18.6 Chantier RGF – Cénozoïque
(Tertiaire et Quaternaire) du
Bassin parisien : avancées
récentes, état des lieux des
données, questions scientifiques,
nouvelles pistes de recherche,
applications et perspectives**



Modélisation géologique et hydrogéologique 3D de la partie Est de la région parisienne : construction du prototype Prodhyge

Justine Briais¹, Timothée Dupaigne¹, Nicolas Marie^{*2}, Delphine Allier¹, Thomas Klinka¹

¹ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – France

² Univ Rennes, CNRS, Géosciences Rennes - UMR 6118, 35000 Rennes, France

La construction d'un modèle 3D géologique et hydrogéologique du bassin de Paris dans le cadre du Référentiel Géologique de la France, intégrant les travaux récents, implique de mettre au point un pilote qui permette d'élaborer la méthodologie avant un déploiement à plus grande échelle. A l'Est de Paris, sur une zone d'environ 650 km², la Brie, de nombreuses ressources en eau souterraine sont exploitées avec des problématiques variées tant au niveau quantité (difficultés d'approvisionnement en eau potable) que qualité (pollutions par les pesticides). Cette zone bénéficie d'un lot de données particulièrement important en raison d'un suivi renforcé de plusieurs nappes. Elle est de plus représentative du bassin avec des terrains majoritairement tertiaires à l'affleurement, et une occupation des sols mixte : urbaine et rurale.

La connaissance géologique du tertiaire (Eocène-Oligocène) est fondamentale pour la compréhension (1) des processus hydrogéologiques et (2) des aléas i.e dissolution de gypse en Ile de France. Les variations latérales de faciès sédimentaires conditionnent l'extension latérale des nappes, les échanges verticaux entre niveaux géologiques plus ou moins perméables et la productivité des aquifères.

En milieu urbain dense, outre la disponibilité des ressources en eau souterraine, la géométrie des corps sédimentaires et les faciès sont à l'origine d'aléas de type inondations par remontée de nappes et mouvements de terrain (gypse et argiles gonflantes principalement). Les enjeux sont donc à la fois environnementaux, sociétaux et financiers.

Prodhyge a permis de collecter et d'acquérir de nombreuses données géologiques et hydrogéologiques (notamment des diagraphies de forages et des résultats de pompages d'essai), permettant de nourrir un modèle géologique et hydrogéologique 3D à haute résolution afin de mieux quantifier et qualifier les systèmes aquifères dans une zone à fort enjeu. Ce travail permet également de mettre à jour de manière systématique des bases de données publiques (Banque de données du Sous-Sol et BDLISA avec l'ambition de transformer les emprises des entités hydrogéologiques en donnée tridimensionnelle).

Mots-Clés : modélisation géologique, faciès, aquifères, propriétés hydrodynamiques, bancarisation



A synthetic structural map of Tertiary formations in the Paris Basin

Stephen Brown^{*1}, Laurent Beccaletto³, Agathe Jullien-Sicre¹, Yves Missenard¹,
Philippe Robion², Cécile Allanic³,

¹Université Paris-Saclay, UMR GEOPS - France

²Géosciences et Environnement Cergy, CY Cergy Paris Université (GEC) - France

³BRGM - France

Sedimentary basins are subject to tectonic stresses that propagate from continental plate boundaries. The resulting strain can vary: the lithosphere can buckle and fold, brittle deformation can occur, often reactivating basement faults, and microstructure networks of faults, joints and veins can develop on a local scale. These intraplate deformations, either attributed to the Pyrenean Orogeny or to the Alpine Orogeny, are present in Tertiary formations of the Paris Basin. Tectonic structures directly affect the stratigraphic architecture and facies of sedimentary deposits. However, when compared with the well-documented architecture of sedimentary deposits and tectonic structures of the Paris Basin, relatively little is known about the relationship between the two. Preliminary results of this PhD revisit the tectonic structures of Tertiary formations using new and existing data.

Since 2000, the BRGM reprocessed thousands of kilometers of industrial seismic lines covering the entire Paris Basin. We propose an interpretation of the base of Tertiary formations in the Paris Basin, calibrated by hundreds of wells with velocity surveys. Strategically placed geological cross sections made with well data containing the top depth of different Tertiary stages, combined with information from geological maps (1/50 000 scale edited by the BRGM), reveal the Cenozoic tectonic structure of the Paris Basin.

Interpreted seismic lines and geological cross sections make up the initial results of this PhD, illustrated by a synthetic structural map of Tertiary deformations in the Paris Basin. This map shows long wavelength and low amplitude post-Mesozoic undulations along with faults traversing the Tertiary base.

The continuation of this PhD will involve fieldwork with structural observations (deformation directions, geometry, density, distribution) and sample collecting as well as laboratory work (magnetic and wave velocity anisotropy and in-situ U-Pb calcite dating) in order to constrain the temporal and spatial evolution of paleo stresses propagating from tectonic plate limits.

Keywords: Paris Basin, Cenozoic deformations, tectonic, faults, folds, inherited structures



Late Quaternary in the Paris Basin: 3D restitution of alluvium geometry in the bottom of major valleys in the Seine catchment

Diana Chourio-Camacho^{1*}, Jean-Louis Grimaud¹, Hélène Tissoux², Paul Bessin³, MarkNoble¹, Pierre Voinchet⁴

¹ PSL University/ MINES Paris Tech, Centre de Géosciences, 35 rue St Honoré, 77305 Fontainebleau Cedex, France

² BRGM, Unité Géologique de l'Aménagement des Territoires, Orléans, France

³ LPG- Le Mans, UMR 6112, Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans, France

⁴ Département de Préhistoire du Muséum national d'Histoire naturelle, UMR 7194, 75013 Paris

River valleys represent major transfer zones between the source of sediments and their ultimate basin sink. The geometry of these valleys and the long profiles of the river they host is adjusted to hydrodynamics, tectonic deformation or lithogenic changes. Understanding alluvial infilling storage and release dynamics within these valleys is thus fundamental to link landscape and fluvial sediment export.

The erosion geometry and alluvial infill in the valleys of the Seine River watershed drained area result from Late Quaternary climate changes. The alluvial infill constitutes major socio- economic axe within the Paris Basin. This infill is also a key compartment in the hydrological exchanges between bedrock and alluvial aquifers, and the Seine River. Finally, the alluvium is available as aggregate resource which is exploited from the source of the Seine River in eastern France to Le Havre.

The aim of this study is (i) to characterize the large-scale geometry of the erosive contact between the bedrock and the alluvium and (ii) to quantify the alluvium volume stored at the bottom of major valleys of the Seine watershed. The objective is to decipher between the respective impacts of lithology, climate changes (eustatism and/or hydraulic regime) and large wavelength deformation pattern on the erosion geometry and subsequent sediment infilling.

For this purpose, a database consisting of thousands of boreholes that cross-cut the alluvium has been created from the Banque du Sous-Sols (BSS) dataset with the Seine catchment. These boreholes were used to define the main characteristics of the alluvium such as sediment facies (grainsize) and the bedrock lithology.

In order to constrain the timing of development of the valley, samples were taken along the Seine and will be dated by the electron spin resonance (ESR) and optically stimulated luminescence (OSL) methods.

First results on the Seine catchment valleys will be presented here, in order to demonstrate the variability in valleys geometry and facies according to bedrock lithology and the position of the river in the catchment.

Keywords: Paris Basin, alluvial terraces, Quaternary, ESR, OSL.



Variations et diversité des faciès lutétiens de l'Aisne et de la Marne : impact sur les gisements de pierres calcaires

Gilles Fronteau ^{*1}, Sébastien Laratte ¹, Alain Devos ¹

1 : Université de Reims Champagne Ardenne – GEGENAA - France

Les calcaires du Lutétien du Bassin parisien montrent une importante variabilité verticale et latérale. Et localement, les besoins réexprimés d'approvisionnements en pierres de taille (chantiers des cathédrales par exemple), remettent en lumière l'importance de ces variations sédimento-diagénétiques, qui impactent directement la nature des gisements de calcaires.

Encore bien développées dans l'Aisne, les formations du Lutétien inférieur se retrouvent brutalement très limitées à presque inexistantes à partir de Fismes, avec la quasi-disparition des sables glauconieux de base et des couches à *Nummulites laevigatus*, qui par exemple à Hermonville (carrières de Rougemont et du Mont Chatté) sont réduites à seulement 1 m d'épaisseur.

Le Lutétien moyen est lui aussi affecté, notamment par deux changements radicaux de faciès, qui rendent parfois difficiles la comparaison des séries de la Marne avec la série lutétienne type, établie en région parisienne. En partie inférieure, les calcaires poreux type Banc de Saint-Leu (Banc franc de Noyant), passent à des alternances de bancs irréguliers, de Calcaires à *Ditrupea*, qui n'offrent absolument pas les mêmes capacités d'usage comme pierre de taille. Tandis que dans la partie supérieure, riche en *Orbitolites complanatus*, les calcaires microgranulaires poreux, qui dans le Soissonnais ou le Laonnois sont très proches des précédents, passent dans la Marne, à des faciès à matrice micritique et coquilles de mollusques préservées. Ce sont ces derniers qui furent principalement recherchés pour la pierre de taille fine et intensément exploités dans les hauts des versants des vallées de l'Ardre et de la Vesle ou dans le Massif de Saint-Thierry. Plus vers l'est encore, à partir de la diagonale Chamery, Fleury-la-Rivière, Boursault, le faciès se modifie encore avec le passage au Tuffeau de Damery, qui n'existe que sur une bande d'environ 5 km de large : calcaire peu cimenté, réputé pour ses gisements fossilifères, il fut aussi utilisé localement comme pierre à bâtir « tendre ». Ce faciès laisse ensuite la place à des formations continentales de faible puissance, essentiellement argileuses, dont la stratigraphie, en Montagne de Reims, est confuse. Le Lutétien supérieur, qui affleure peu et dont les limites stratigraphiques inférieures et supérieures sont mal marquées, est lui aussi très variable, tant verticalement que latéralement. Plusieurs faciès de calcaires à cérithes (terme ici utilisé au sens large), de calcaires lacustres à limnées et des calcaires sublithographiques sont observés, utilisés comme pierres résistantes pour le bâti ou le macro-outillage. Et si les successions exactes restent mal connues et les affleurements désormais peu visibles, les sous-faciès du Soissonnais, du plateau du Chemin des Dames/Laonnois et de la Marne semblent nettement différents.

Ainsi, si l'étage géologique Lutétien est réputé très largement étudié et très bien connu ; à l'échelle d'un séquençage stratigraphique et d'un partitionnement géographique précis, de nombreuses inconnues demeurent encore. Ce sont pourtant ces fines variations, qu'il nous faut redécouvrir, qui conditionnent ou ont conditionné les types de pierres disponibles et les approvisionnements en géomatériaux aux échelles locales et régionales.

Mots-Clés : Lutétien, Bassin de paris, stratigraphie, pierre à bâtir, faciès, pétrographie



Approche intégrée géotechnique, géologique et hydrogéologique dans la modélisation géostatistique 3D des terrains cénozoïques et du régolithe du Grand Paris Express

Lucas Lachérade ^{*1,2}, Isabelle Halfon ², Luc Closset ², Alain Denis ¹, Antoine Marache¹, Jérémy Rohmer ², Florence Quesnel ³

1 : Université de Bordeaux, CNRS, Arts et Métiers Institute of Technology, Bordeaux INP, INRAE, I2M Bordeaux, F-33400 Talence, France

2 : BRGM, Direction des Risques et Prévention, Orléans,

France3 : BRGM, Direction des GéoRessources, Orléans, France

La connaissance du sous-sol urbain constitue un des grands enjeux actuel et futur dans le cadre de projets d'aménagements souterrains. Cette connaissance est souvent partielle et imprécise, induisant ainsi des risques importants lors de la phase de construction des ouvrages. Une meilleure compréhension et maîtrise des propriétés du sous-sol permettrait de réduire ces incertitudes et de diminuer les risques pour les maîtres d'ouvrages et les concepteurs.

Le sujet de thèse ici présenté - et débuté en avril 2021 - vise à répondre à ce besoin à travers une approche originale de modélisation 3D qui intègre à la fois des informations géologiques, géotechniques et hydrogéologiques et qui sera appliquée à certains tronçons du Grand Paris Express (GPE). Ce grand projet d'infrastructure a en effet permis de collecter de nombreuses données, mais qui ont le plus souvent été analysées localement dans les démarches classiques de dimensionnement géotechnique.

Une première partie du travail consiste à concevoir un modèle géologique et géotechnique 3D, basé sur l'interprétation fine de sondages carottés et de sondages géotechniques. Ce modèle permet le rattachement des essais géotechniques aux différentes unités lithostratigraphiques et aux profils d'altération les affectant.

Dans un second temps, plusieurs méthodes géostatistiques (déterministes et algorithmes stochastiques) seront employées, afin d'identifier les principales zones géotechniques et le comportement des propriétés géotechniques dans chacune. En outre, la pertinence de ces méthodes géostatistiques sera évaluée à travers une réflexion menée sur la quantification des incertitudes liées à ces différentes méthodes de spatialisation.

En parallèle, une partie conséquente du travail porte sur une démarche innovante en géotechnique, à travers l'intégration de l'information géologique et hydrogéologique en tant que données auxiliaires et surtout une recherche visant à établir des lois de corrélation entre propriétés géotechniques et profils d'altération.

Mots-Clés : Géotechnique, Géologie, Géostatistique, Régolithe, Modélisation 3D



Isotopic stratigraphy of the Eocene/Oligocene deposits from the Cormeilles-en-Parisis section (Paris Basin, France)

Laurence Le Callonnec^{*1}, Jean-Paul Baut², Jean-Jacques Châteauneuf³, Francesca Cherchi¹, Laurent Emmanuel¹, Jean-Pierre Gély⁴, Bertrand Génault⁵, Didier Merle⁶, Daniel Obert¹, Maurice Renard¹, Janine Riveline¹, Pierpaolo Zuddas¹

1 : Sorbonne Université, UPMC Univ. Paris 06, ISTeP - UMR 7193, Laboratoire Paléoenvironnements, Paléoclimats, Bassins - Case 116 - 4, Place Jussieu - 75252 Paris cedex 05, France.

2 : 3, rue Toulouse Lautrec – 91460 Marcoussis, France. 3 : 8, Quai du Châtelet – 45000 Orléans, France.

4 : Laboratoire de Médiévisitisme Occidentale de Paris (Université Paris I – Panthéon Sorbonne, UMR8589) – 1 rue Victor Cousin – 75232 Paris cedex 05, France.

5 : 4bis, rue Chantault – 28000 Chartres, France.

6 : Sorbonne Université (CR2P, MNHN, CNRS, UPMC), Muséum national d'Histoire naturelle, 8 rue Buffon, F75005 Paris CP43, France.

The Cormeilles-en-Parisis quarry was one of the most important open-mines for gypsum extraction in Europe in the 19th century. The sedimentary formations between the “Deuxième masse de gypse” and the “Sables de Fontainebleau” including the **Eocene - Oligocene transition** were continuously accessible.

An isotopic study (stable isotopes of carbon and oxygen) was carried out on the calcium carbonate component of the sediments. This study is the first of importance on this topic since the previous work of Fontes et Létolle (1976).

The isotopic record appears to be independent of the lithological variability (gypsum, marl and limestone). No relationship between isotopic values and CaCO₃ content is observed. The $\delta^{13}\text{C}$ trend shows a relatively stable evolution of the ratio (-3 to -4‰) from the “Deuxième masse de gypse” to the top of the “Argile verte de Romainville”. However, a negative excursion occurs in the “Calcaire de Sannois” (-7.7‰). Then, the ratio increases gradually, while showing short and significant fluctuations from 2‰ in amplitude, up to the top of the studied section (“Sables de Fontainebleau”, +1‰).

The evolution of the $\delta^{18}\text{O}$ shows a progressive and sinusoidal increase (-5‰ to -1‰) on which 3 short positive peaks of amplitude higher than 3‰ are superimposed. The first one is located at the top of the “Marnes bleues d'Argenteuil”, the second at the base of the “Calcaires de Sannois” and the last one at the base of the “Marnes à Huîtres”.

The isotopic records are comparable to those obtained from the pelagic sediments and the planktonic and benthic foraminifera for the same time interval. The $\delta^{18}\text{O}$ fluctuations are partly controlled by climate variations (step cooling) at the global scale. Stratigraphic correlations of the studied section with the oceanic realm can be established. The three positive $\delta^{18}\text{O}$ peaks may correlate with the main isotopic events **EOT1 and 2** and **OI1** (Katz *et al.*, 2008). They may also correspond to environmental changes such as hydrological changes. The Eocene - Oligocene boundary would be stratigraphically placed near the boundary between the “Marnes bleues d'Argenteuil” and the “Marnes blanches de Pantin” and therefore is lower than previously established (base of the “Glaises à Cyrènes”). This new proposal would be consistent with important environmental and paleontological changes observed at the transition between these two sedimentary formations.

Keywords: EOT, Priabonian, Rupelian, stable isotopes, step cooling

References: FONTES J.Ch. et LETOLLE R. (1976) - ^{18}O and ^{34}S in the Upper Bartonian gypsum deposits of the Paris Basin. *Chemical Geology*, 18, 285-295. KATZ M.E. *et al.* (2008) – Stepwise transition from the Eocene greenhouse to the Oligocene icehouse. *Nature Geoscience*, 1, 329-334.



Etude de la surface des grains de Quartz (M.E.B) appliquée à l'approche Source-to-Sink (production et transfert) : le cas d'étude du Cénozoïque du Bassin de Paris.

Nicolas Marie* ⁽¹⁾, François Guillocheau ⁽¹⁾, Justine Briais ⁽²⁾, Cécile Robin ⁽¹⁾, Eric Lasseur ⁽²⁾.

⁽¹⁾ Univ Rennes, CNRS, Géosciences Rennes - UMR 6118, 35000 Rennes, France

⁽²⁾ BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, 45060 Orléans CEDEX, France

La compréhension d'un système Source-to-Sink au sein de bassins sédimentaires nécessite la caractérisation de deux paramètres clés : la source et le mode de production de sédiment (érosion physique / chimique), ainsi que la distance de la zone de transfert. La forme des grains de quartz peut enregistrer (1) la production physique ou chimique du grain, (2) les processus (éolien / fluviatile) de transfert des sédiments, et (3) l'émersion et altération post-dépôt.

La présence de l'altération chimique est mise en avant par des microstructures en lien avec la dissolution (triangles de dissolution orientés, fossés de dissolution, figures de circulation de fluides, desquamation) ou la précipitation (surcroissance cristalline et globules, fleurs et pellicule de silice). Les différences entre les processus éoliens et fluviatiles sont principalement basées sur l'arrondissement du grain ainsi que le type d'impacts majoritaires présents à la surface du grain (cassures conchoïdales, marques de percussions et de frottements).

Cette approche a été appliquée avec succès à l'étude du Cénozoïque du Bassin de Paris, un système en faible accommodation (200m en 35 Ma maximum) recoupant de nombreux hiatus. La présence de microstructures témoignant d'une corrosion de la surface du grain dénote une altération chimique antérieure à l'apparition des critères d'un transport éolien ou fluviatile. Cette altération chimique est marquée au cours du Paléocène et au début de l'Eocène. Un transport éolien apparaît au cours du Danien, Lutétien et Bartonien tandis qu'un transport fluviatile domine au Danien, Thanétien et Yprésien. La présence d'émersions majeures marquées par la formation de latérites in situ apparaît à la fin du Paléogène, Yprésien et Bartonien, et des mineures au cours du Thanétien. La surimposition de microstructures issues de l'altération chimique lissées par l'action du transport fluviatile ou éolien témoigne de la présence de ces périodes d'émersions anté-transport.

Mots-Clés : Source-to-Sink ; Cénozoïque ; Bassin de Paris ; Exoscopie ; Quartz



Etude à haute-résolution des dépôts de l'Eocène moyen du Bassin de Paris

Nicolas Marie* ⁽¹⁾, François Guillocheau ⁽¹⁾, Justine Briaïs ⁽²⁾, Cécile Robin ⁽¹⁾, Eric Lasseur ⁽²⁾.

(1) Univ Rennes, CNRS, Géosciences Rennes - UMR 6118, 35000 Rennes, France

(2) BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, 45060 Orléans CEDEX, France

Le Cénozoïque du Bassin de Paris est une période de faible subsidence (200 m en 35 Ma maximum), associée à de nombreux hiatus sédimentaires.

L'étude à haute résolution spatiale et temporelle d'affleurements ainsi que les corrélations par stratigraphie séquentielle et « stacking pattern » de plus de 500 puits, ont permis de caractériser l'évolution de la géométrie du bassin et de sa paléogéographie durant l'Eocène moyen, par l'établissement de 7 jeux de cartes d'isopaques et de cartes de faciès.

(1) La Fm des Marnes et Caillasses réputées caractéristiques du Lutétien supérieur et du Bartonien basal est en réalité diachrone passant latéralement à des faciès lagunaires, puis à des faciès marins protégés.

(2) Le sommet de la Fm des Marnes et Caillasses est incisé par un réseau de chenaux/vallées incisées de largeur plurikilométrique pour une profondeur maximale de 30 m, dont le réseau de direction nord-sud et nord-ouest–sud-est, est ici présenté. Les interfluves de ces chenaux sont altérés. Ces paléo-incisions sont comblées par les sédiments de la Fm des sables d'Auvers. Cette incision traduit une surrection de l'ensemble du bassin durant le Bartonien inférieur et un changement drastique de système sédimentaire.

(3) Les premiers dépôts estuariens de la Fm des Sables d'Auvers sont en onlap sur la paléotopographie précédente.

Le Bartonien est un exemple remarquable de système dit à faible accommodation, c'est-à-dire caractérisé par une faible création d'espace disponible, faisant alterner des périodes d'érosion, de transit ou de non-dépôts et des périodes brèves à fort potentiel de préservation de sédiments, notamment d'exceptionnels faciès de marées. L'extension des différentes séquences du Bartonien, leurs faciès (marin, lacustre, lagunaire et éoliens) est présentée, dans un contexte stratigraphique bien contraint (effet du partitionnement volumétrique notamment). Cette étude permet de reconstituer en 3D, à haute-résolution spatiale et temporelle, la géométrie des dépôts de l'Eocène moyen du Bassin de Paris afin de prédire les variations latérales et verticales des caractéristiques pétro-physiques des différents faciès étudiés.

Mots-Clés : Bassin de Paris, Éocène, Lutétien, Bartonien, Stratigraphie séquentielle, Vallées incisées.



L'Optimum Climatique de l'Eocène Moyen dans le Bassin de Paris. Enregistrement d'un événement hyperthermal en domaine littoral.

Loïc Marlot^{*1}, Damien Huyghe¹, Justine Briais², Christine Flehoc², Laurent Emmanuel³

¹Mines Paristech – Centre de Géosciences – France

²BRGM – France

³Sorbonne Université – IStEP - France

L'Optimum Climatique de l'Eocène Moyen (MECO), événement hyperthermal rapide (50ka) et global de l'Eocène moyen (40Ma), est notamment caractérisé par une augmentation de la température des eaux de fond et de surface de 4 à 6°C en domaine océanique. Les causes de ce réchauffement demeurent inexplicées mais il est associé à une augmentation de la pCO₂ atmosphérique. Ces caractéristiques font du MECO un analogue du réchauffement actuel. Le MECO est bien documenté en milieu océanique, mais l'analyse des foraminifères océaniques ne permet d'obtenir que des données climatiques moyennées et ne permet pas un suivi à très haute résolution des variations pluriannuelles de températures et du gradient saisonnier de température.

C'est pourquoi cette étude se focalise sur le Bassin de Paris, présentant (1) un enregistrement sédimentaire important et varié en domaine marin proximal à l'Eocène moyen et (2) une grande biodiversité et une qualité de préservation paléontologique remarquable. Des études ont montré que le MECO serait bien enregistré dans la stratigraphie du Bassin de Paris, à la base de l'Auversien et sur l'île de Wight, mais sa localisation exacte dans les archives sédimentaires reste à déterminer.

Le but de cette étude est donc (1) de localiser précisément le MECO par une approche chimiostratigraphique ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) dans les dépôts littoraux du Bassin de Paris, (2) de déterminer les caractéristiques climatiques (T° moyenne annuelle et gradient saisonnier) de cet événement par l'analyse isotopique des coquilles de mollusques et (3) de déterminer la réponse sédimentaire associée à ce réchauffement en contexte de bassin intracratonique. Pour cela, nous menons une approche couplée terrain et laboratoire avec l'étude des affleurements et l'échantillonnage de coquilles mollusques dans les sables marins de l'Auversien, dans une zone allant de la région du Vexin au Tardenois.

Les résultats préliminaires confirment l'enregistrement d'un réchauffement au sein de la formation des Sables d'Auvers, à la base de l'Auversien.

Mots-Clés : Paléoclimats, MECO, géochimie isotopique, mollusques



Production et faciès carbonatés continentaux du Cénozoïque du Bassin de Paris

Kévin Moreau^{*1}, Simon Andrieu², Justine Briais², Benjamin Brigaud¹

1 : Université Paris-Saclay, CNRS, GEOPS, Orsay Cedex, France

2 : BRGM, Direction des GéoRessources, Orléans, France.

Afin d'identifier les facteurs contrôlant la répartition des faciès et les architectures descarbonates continentaux cénozoïques du Bassin de Paris, ce travail synthétise l'étude de 16 nouveaux affleurements, de 52 coupes sédimentaires issues de la littérature, et intègre 16 nouveaux forages carottés dans les formations yprésiennes à aquitaniennes, du nord de Paris jusqu'à Orléans et Provins. Au travers de 2 transects de corrélation, cette étude a permis de déterminer l'évolution spatiale des environnements de dépôts et des faciès sédimentaires permettant de préciser les architectures de 4 systèmes sédimentaires carbonatéscontinentaux :

- (1) Une large plateforme carbonatée s'étend sur le bassin de Paris (Lutétien supérieur à Bartonien inférieur), caractérisée par des faciès de lagon au centre du bassin et des faciès de brèches à clastes micritiques riche en quartz, typique de paléosols sur les bords méridionaux du lagon.
- (2) Un profil de lac carbonaté (Bartonien supérieur), marqué par une alternance de calcaires wackestone à characées et de marnes blanches au centre du bassin ; ces faciès passent latéralement à des calcaires silicifiés ou à des marnes vertes sur les bordures Est et Sud, et à des sables marins littoraux au Nord-Ouest.
- (3) Un lac endoréïque, mixte évaporitique-carbonaté (Priabonien) se compose de masses de gypses au centre évoluant vers des brèches carbonatées micritiques ou silicifiées riches en *Microcodium*, typique de caliche sur les extrémités du bassin.
- (4) Un dernier lac (Rupélien terminal à Aquitanien) formé de faciès lacustres et palustres variés, dont les croûtes microbiennes, les oncoïdes et les indices d'émersions sont des acteurs majeurs de la sédimentation périphérique.

Outre les facteurs de contrôle classique pour les dépôts carbonatés (tectonique, climat et eustatisme), la sursaturation des milieux palustre et lacustre en ions Ca^{2+} et HCO_3^- provenant du lessivage des massifs carbonatés favorise la production micritique lors des périodes plus sèches. Les organismes microbiens participent aussi activement à la production carbonatée lors de l'Aquitaniens.

Mots clés : Bassin de Paris, sédimentologie de bassin, plateforme carbonatée, faciès carbonaté, faciès continental, Cénozoïque, stratigraphie séquentielle.

^{*}Intervenant



Le forage de Maisse, une nouvelle coupe de référence pour le Cénozoïque du Bassin de Paris

Kévin Moreau^{*1}, Maria Moreno-Soler², Benjamin Brigaud¹, Simon Andrieu³, Johann Schnyder², Justine Briais³, Florence Quesnel³, Didier Merle⁴, Nelly Assayag⁵, Magali Ader⁵, Thierry Gaillard⁶, Véronique Durand¹

1 : Université Paris-Saclay, CNRS, GEOPS, Orsay Cedex, France.

2 : Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP), UMR 7193 CNRS, Sorbonne Université, F-75005 Paris, France.

3 : BRGM, Direction des GéoRessources, Orléans, France.

4 : Sorbonne Université, UMR 7207 CNRS (CR2P), Muséum national d'histoire naturelle, 8, rue Buffon, 75005 Paris, France.

5 : Université de Paris VII, CNRS, Institut de Physique du Globe de Paris, 75005 Paris, France.

6 : CPGF-HORIZON, 49 avenue Franklin Roosevelt, 77210 Avon.

Nous présentons ici les données acquises sur un nouveau forage carotté de 120 mètres de profondeur dans la commune de Maisse dans l'Essonne (91). Ce forage recoupe les formations tertiaires depuis la base des Sables de Fontainebleau jusqu'au toit de la Craie. La carrière de Maisse, située à proximité du forage, permet de compléter la description en incluant le Calcaire d'Etampes sus-jacent. L'objectif principal de ce travail est de proposer une coupe sédimentologique inédite et de référence des formations Cénozoïques du Bassin parisien, notamment dans les faciès carbonatés éocènes et oligocènes. Cette description est couplée avec une caractérisation de l'isotopie des carbonates ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$), de la minéralogie des argiles (diffraction des rayons X) et de la typologie de la matière organique (MO) des formations yprésiennes (Pyrolyse Rock-Eval et palynofaciès). La base du forage, correspondant *a priori* à l'Yprésien, est composée de dépôts de plaine d'inondation, débutant par une unité de galets à silex dans une matrice sableuse à la base et passant à une alternance de niveaux argilo-sableux, ligniteux et carbonatés. Les analyses sur la MO mettent en évidence deux niveaux à l'enrichissement organique contrasté, composés de MO d'origine terrestre autochtone (Type III). Plus haut dans l'Yprésien, ce système sédimentaire passe à un environnement de lagon marin à saumâtre, bien développé au Lutétien avec des faciès micritiques floatstones riches en *Serratocerithium*, ou à Veneridae, et caractérisé par des valeurs $\delta^{18}\text{O}$ fluctuant entre -4‰ et 2‰. Au Bartonien, l'unité que nous attribuons au Calcaire de Saint-Ouen, micritique et silicifié (opale C-T), présente un assemblage argileux marqué par la présence de sépiolite et de palygorskite marquant un environnement lacustre confiné et soumis à une forte évaporation. Aux Priabonien et Rupélien basal, les Calcaires de Champigny et de Brie présentent un assemblage composé de smectite, illite et kaolinite, dans des faciès bréchiques et micritiques à *Microcodium*. Les données isotopiques des calcites sont cohérentes avec une signature d'eau météorique dans un paléosol. Enfin, le Rupélien terminal enregistre par le Calcaire d'Etampes le bord d'un lac soumis à la pédogénèse, avec des alternances de calcaires mudstones et de calcaires à traces de racines.

Mots clés : Bassin de Paris, sédimentologie de bassin, faciès carbonaté, faciès continental, Cénozoïque, stratigraphie séquentielle, palynofaciès, Rock-Eval, argile, paléoclimat, isotopie de l'oxygène, isotopie du carbone.

*Intervenant



Conditions d'hydrolyse au cours du Lutétien-Bartonien dans le Bassin parisien : apport des forages d'Ussy-sur-Marne et du Tillet

Pierre Pellenard^{*1}, Théo Martinez¹, Justine Briaïs², Justine Blondet¹, Florence Quesnel², Eric Lasseur², Ludovic Bruneau¹, Anne-Lise Santoni¹

¹Laboratoire Biogéosciences, UMR CNRS 6282/uB, Université Bourgogne Franche-Comté, France

²BRGM, Georesources Division, Orléans, France

L'évolution des conditions climatiques du Paléogène a donné lieu à plusieurs synthèses régionales et globales. Le Bassin parisien, qui est l'un des bassins historiques pour la connaissance des dépôts cénozoïques, a été paradoxalement peu étudié du point de vue des paléoclimats. Cela s'explique par des affleurements dispersés, combinés à une grande variation des environnements de dépôts alternant entre continental et marin ouvert, et un calage stratigraphique complexe. Si les reconstitutions de températures sont accessibles par les données floro-faunistiques et isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$), l'évolution des conditions hydriques et leurs conséquences sur la production et le transport des sédiments terrigènes (argiles, sables) sont peu documentées pour le Bassin parisien. Nous nous intéressons ici à l'Eocène inférieur et moyen, période qui a enregistré deux périodes d'optimum climatiques, le premier autour de 50 Ma (EECO ; Early Eocene Climatic Optimum) et le second à 40 Ma (MECO ; Middle Eocene Climatic Optimum). Une étude combinant minéralogie, étude des assemblages argileux et du $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ a été réalisée sur les dépôts 1) du forage d'Ussy-sur-Marne (NE Paris, Seine-et-Marne) qui recoupe les formations des Calcaires à *Ditrupea strangulata*, des Calcaires à Miliolites et Orbitolines, des Marnes et Caillasses inférieures, de l'équivalent des Falun de Foulanges, des Marnes et Caillasses inférieures et des Sables d'Auvers et de Beauchamp, 2) du forage historique du Tillet (N Paris, Oise) qui débute dans la craie du Campanien et se termine dans les Sables de Beauchamp du Bartonien. Pour ce dernier, les dépôts du Lutétien inférieur (Calcaires à *Nummulites laevigatus*) aux Sables de Beauchamp du Bartonien ont été étudiés. Les données de $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ permettent d'affiner les corrélations établies sur la base des unités lithostratigraphiques, des valeurs plus positives étant enregistrées dans les Calcaires du Lutétien, contrastant avec la signature isotopique de l'Yprésien et du Bartonien. Les données minéralogiques sont très cohérentes entre les 2 forages et montrent des variations importantes dans la nature des assemblages argileux. L'arrivée d'argiles fibreuses (palygorskite, sépiolite) couplées aux smectites et à la clinoptilolite à partir des Marnes et Caillasses inférieures, tranche d'avec la sédimentation dominée par des assemblages d'illite, interstratifiés IS R1, smectite et kaolinite du début du Lutétien, qui reprendra avec les Sables d'Auvers et de Beauchamp. Cet épisode témoigne d'une aridification à l'échelle du Bassin parisien à la fin du Lutétien, en parallèle d'une baisse du niveau marin, en accord avec la présence sporadique d'horizons évaporitiques.

Mots-Clés : Minéraux argileux, chemostratigraphie, altération continentale, Eocène, Bassin de Paris



Cartographie pédago-géologique du Département de l'Essonne

Florence Quesnel ^{1,*}, Isabelle Bernachot ¹, Frédéric Chêne ¹

¹ : BRGM, Direction des GéoRessources, Orléans, France

Le Département de l'Essonne mène une politique volontariste de préservation des espaces et paysages naturels et plusieurs actions concernant le patrimoine géologique. Les carrières et sites fossilifères y représentant près de 300 ha, l'Essonne est l'un des berceaux historiques de la géologie en tant que science : au XVIII^{ème} siècle, Guettard et Lavoisier y dessinent les premières cartes minéralogiques, puis au siècle suivant Alcide d'Orbigny décrit les couches de la région d'Étampes. L'Essonne abrite la première Réserve naturelle des sites géologiques de France, créée en 1989 et qui préserve des couches de référence de l'époque stampienne. Des vestiges paléontologiques de premier ordre ont par ailleurs été mis au jour à Saulx-les-Chartreux, à Morigny-Champigny ou encore à Itteville. En tant que gestionnaire de la Réserve, le Département s'attache à valoriser ce patrimoine scientifique, d'autant que la géologie explique l'organisation des paysages, influe sur la biodiversité et conditionne les activités humaines qui s'exercent en surface.

Le BRGM mène depuis fin 2020 un projet trisannuel de valorisation de la carte géologique à 1/50 000 cofinancé par le Département pour accompagner les travaux de diffusion de la Réserve, avec entre autres objectifs de diffuser la connaissance sur la géologie auprès des populations locales et des acteurs du territoire (applications mobiles, expositions, conférences, manifestations, supports de communication papier ou numérique...). Chaque année plusieurs réunions permettent de discuter de l'avancement des livrables avec les acteurs de la Réserve et les membres de son Conseil scientifique qui sont des géologues, paléontologues ou acteurs de la préservation du patrimoine géologique.

Le document élaboré la première année sera présenté et comporte :

- La carte géologique simplifiée issue des contours à 1/50 000 numérisés et harmonisés de la Région Ile de France, avec quelques corrections et un ombrage ciblé pour visualiser les éléments du relief, ainsi que les sites géologiques majeurs de la Réserve,
- Une légende novatrice reprise et modifiée de celle de la carte Paris et environs (Charles et al., 2021) qui permet de i) mieux cerner la durée de dépôt des unités géologiques cartographiées (du Quaternaire, du Tertiaire et très peu du Crétacé), les hiatus et épisodes de déformation, d'altération et d'érosion et ii) d'identifier facilement les enjeux sociétaux (ressources minérales, aquifères et risques géologiques potentiels) dans ces unités,
- Un schéma structural, une coupe géologique traversant l'Essonne du Nord au Sud, et deux piles géologiques synthétiques illustrant les variations latérales de faciès qui caractérisent le département, imposées par le contexte de bordure sud du Bassin parisien.

Ce document sera discuté par rapport aux actions réalisées dans le cadre du Chantier RGF- Bassin parisien.

Mots-Clés : Carte géologique, Pédagogie, Diffusion scientifique, Patrimoine géologique, Département de l'Essonne, Région Ile de France



Evolution du cours de la Loire au Pléistocène et relation avec la géodynamique du Bassin parisien

*Serin--Tuikalepa Iale^{1,2}, Tissoux Hélène^{1,2}, Voinchet Pierre², Bahain Jean-Jacques²

¹ BRGM, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, France.

² UMR7194 HNHP, MNHN-CNRS-UPVD, Département Homme et Environnement, Muséum National d'Histoire Naturelle, France.

Dès les années 1970, plusieurs chercheurs ont proposé l'hypothèse de l'existence d'un paléo-écoulement plio-pléistocène de la Loire du sud vers le nord, depuis le Massif Central passant par les vallées actuelles du Loing puis de la Seine pour aller rejoindre la Manche. Cette hypothèse est appuyée par des témoins de différentes formations sédimentaires alluviales, observées le long de ce tracé sud-nord et attribués à la Loire et à différentes périodes comprises entre le Mio-Pliocène et le Pléistocène inférieur.

Si un tel paléo-cours semble avéré au Pliocène (l'écoulement des « Sables de Lozère »), on s'interroge toujours sur l'existence d'une paléo-Loire pléistocène coulant dans cette direction sud-nord, et, si un tel écoulement a bien existé, sur la date et les moteurs de la fin de celui-ci et de la bifurcation de la Loire vers l'Atlantique selon le cours que l'on connaît aujourd'hui. Cette interrogation repose principalement sur le fait que peu de données chronologiques sont disponibles pour la Loire, tant sur les formations alluviales fossiles suivant le tracé actuel que sur les potentiels témoins plus anciens situés le long de ce paléo-cours, alors que l'évolution de nombreux cours d'eau du Bassin parisien a été calée chronologiquement depuis une vingtaine d'années.

La zone d'étude principale de la présente étude est localisée entre Gien et Blois, où la Loire amorce son coude vers l'ouest en direction de l'Atlantique. Ce travail présente une nouvelle synthèse des connaissances actuelles sur ces différentes formations sédimentaires, caractérisées à partir du croisement de traitement spatial sous SIG, d'analyses minéralogiques et d'observations de terrain. Les premières datations ESR de plusieurs formations alluviales déposées par la Loire seront également exposées.

Mots-Clés : Formations alluviales – Pléistocène – Datations ESR – Loire



Avancées récentes sur le Paléogène inférieur des bassins parisien et belge à partir des mammifères

Thierry Smith ^{*1}

¹ Direction Opérationnelle Terre et Histoire de la Vie – Institut royal des Sciences naturelles de Belgique - Belgique

La compréhension progressive des différents réchauffements climatiques intenses du Paléogène inférieur (PETM, ETM-2, EECO...) a créé un intérêt évident pour une stratigraphie de plus en plus fine des bassins sédimentaires qui ont enregistré ces événements. Ces derniers, identifiés sur base géochimique, demandent à être corrélés avec les événements biologiques qui en découlent et qui ont été, eux aussi, enregistrés dans ces bassins.

Dans ce cadre, les bassins parisien, de Londres et de Belgique, formant le sud du Bassin de la Mer du Nord, représentent des modèles de choix pour la communauté géoscientifique de par leur reconnaissance historique et les étages internationaux Lutétien, Yprésien et Thanétien qu'ils ont respectivement permis de définir.

Si les connaissances sur les dépôts marins ont fait d'énormes progrès notamment grâce aux études micropaléontologiques détaillées, qu'en est-il aujourd'hui des dépôts continentaux souvent délaissés par leur complexité à être interprétés?

Vingt-cinq ans d'expertise en biochronologie mammalienne de notre équipe bruxelloise et de ses collaborateurs sont ici survolés, mettant en exergue l'utilité des mammifères en stratigraphie et paléogéographie. L'exposé porte tant sur des taxons marqueurs que des faunes entières issues de sites historiques ou nouveaux du Bassin parisien et de son complémentaire le bassin belge (Hainin, Maret, Rivecourt, Dormaal, Erquelinnes, Meudon, Sotteville-sur-Mer, Egem, Oosterzele...). Ainsi, des niveaux de référence de l'échelle biochronologique européenne des mammifères du Paléogène (MP) sont précisés, de nouveaux âges à mammifères européens sont identifiés et la stratigraphie tant à l'échelle locale que nord-ouest européenne est affinée. Malgré tout le travail accompli, les questions sont nombreuses et beaucoup reste à faire tant l'étude des faunes de mammifères est incomplète!

Mots-Clés : Stratigraphie, Paléogéographie, Paléogène, Mammifères





T18.8 PIGC





IGCP 679: Cretaceous Earth dynamics and Climate in Asia

Romain Amiot ^{*1}, Gang Li ², Takashi Hasegawa ³, Dae Kyo Cheong ⁴, Petr Schnabl⁵,
Vandana Prasad ⁶

¹ CNRS UMR 5276, laboratoire de Géologie de Lyon, Terre, Planètes,

Environnement, Lyon² Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese

Academy of Sciences, PR China ³ Department of Earth Sciences, Faculty of Science,

Kanazawa University, Japan

⁴ Department of Geology, College of Natural Sciences, Kangwon National University, South Korea

⁵ Institute of Geology of the Czech Academy of Sciences, Czech Republic

⁶ Birbal Sahni Institute of Palaeobotany, India

The IGCP project 679 “Linkage of Cretaceous Solid Earth Dynamics, Greenhouse Climate, and Response of Ecosystems on Land and in the Oceans in Asia” (2019-2023) was approved and supported by the International Geoscience Programme in February, 2019.

Its aim is to promote geoscience communication among the Asian countries, including some countries outside Asia, in various fields including sedimentology, tectonics, paleontology, geochemistry, paleogeography, paleoclimatology and dating among others. This project focuses on the Cretaceous, considered as the most recent, warmest period in the Phanerozoic Era, and characterized by more elevated atmospheric CO₂ levels and significantly higher global sea levels than today. The proposed project will be based on Earth system science to reveal the Cretaceous 'Greenhouse' Earth's oceanic and terrestrial climates and environmental conditions and their evolution. The expected outcome of this project is an in- depth understanding of the existing characteristics of rapid climate and environmental changes and global warming. Processes and mechanisms of the rapid change in climate and environment under greenhouse conditions during the Cretaceous will be explored, as well as the evolutionary responses of biodiversity on land and in the oceans of the Asian continent. Three main topics are addressed: (1) high-resolution Cretaceous geological records of sea and land facies in Asia; (2) paleoclimate and paleoenvironment; (3) the nature of linkages between major geological events and rapid climate and environmental changes, so as to understand biodiversity evolution under greenhouse climate conditions.

These results will provide scientific evidence for human response to contemporary global warming trends.

Mots-Clés : Cretaceous, Asia, Land, Ocean, Earth System, Paleoenvironment, Biodiversity

*Intervenant



The OLLIN 669-IGCP project: Active faults for Seismic Hazard Assessment in Latin American countries

Laurence Audin ^{1*}, María Ortuño^{2*}, Pierre Lacan^{3*}, Julián García-Mayordomo^{4*}

OLLIN network

- 1 : ISTerre/IRD, OSUG Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble,
- France2 : Universidad de Barcelona, Spain
- 3 : UNAM Queretaro, Mexico
- 4 Instituto Geológico y Minero de España - CSIC, Madrid (Spain)

The OLLIN project aims at setting up a new collaborative framework in Latin America based on the European Fault2SHA initiative. OLLIN is taking advantage of an existing collaboration background among specialists from both sides of the Atlantic for seismic hazard research purposes. It structures and represents a network of 97 collaborators from 15 countries since 2019 for the next 4 years. Its main objective, similarly to Fault2SHA, is to bring together earthquake researchers and hazard modelers with a common interest: our societies need newer or better strategies to fill in the gap in knowledge when considering faults and geological data in seismic hazard assessments. OLLIN project comes in a right moment as earthquake geology research is quickly developing in Latin America and there is an urgent need to incorporate these data in the SHA of main populated centers located nearby major active faults. OLLIN (from Tlalollin, earthquake; and ollin, movement, in Nahuatl language) is centered on three major fault zones: the Transmexican Volcanic belt, in México, the Northern South American Plate Boundary, which extends from Ecuador to Colombia and Venezuela, and the Central and Southern Andes, including fault systems from Perú, Argentina and Chile. For each one of these areas, regional working groups have been set, and it is foreseen to host workshops focused on improving fault-hazard modelling methods. Dissemination of the results to society is a crucial aspect of the project, which will be ensured by the participation of stakeholders from civil protection, geological surveys and other end-users in special meetings. The OLLIN project is funded by the International Geoscience Program (IGCP) of UNESCO under the code IGCP669 "Identification of seismogenic faults in populated areas of Latin America and its incorporation into seismic hazard assessment".

Mots-Clés : Seismic Hazards, Megapolis, Latin America, Active Faults, Networking



IGCP 667 Project- Evolution of orogens through time and space: concepts from mapping visualization

Camille François ^{1,*} - Manuel Pubellier ^{1,2} - Christian Robert ² - Cédric Bulois^{2,3}
-Romain Bousquet ⁴ - Siti Nur Fathiyah Jamaludin ⁵ and the IGCP 667 Team ⁶

¹Commission for the Geological Map of the World - France

²Laboratoire de Géologie ENS Paris, CNRS (UMR 8538) - France

³Université Côte d'Azur, IRD, CNRS, Géoazur - France

⁴Kiel Institute of Geosciences - Germany

⁵Universiti Teknologi Petronas – Malaysia

⁶<https://ccgm.org/en/content/11-team>

Orogens are classically thought to develop in a convergence context involving two or more plates of continental and/or oceanic nature. They are defined as deformed crustal areas with topographic building developing from either arc-continent subduction, continental collision or inverted rift basins. However, this definition does not take into account a genetic link of lateral transitions between oceanic domains and intracontinental rifts, while extension associated with scissor-shape opening is demonstrated in many oceanic-floored basins. Herein, we propose a new concept of orogenic evolution based on the former development of extensional margins subject to shortening: we consider accretion and supra-subduction along widely-opened oceanic basins, cordilleras which precede the final continental collision when the two opposite margins finally come into contact and inverted rifts in poorly-extended continental crust. In addition, the concept does include geodynamic processes prior to plate tectonics. As we go backward in time, the main elements are out of our reach due to lack of data, lack of understanding, or a strong erosion, which unroofed the upper levels of the orogen. To do so, we elaborate a world map of past-to-modern orogens to re-explore mountain building concepts. Our work specifically points out similarities and differences of processes through time and along-strike diachronism within opening and closure of oceanic basins. This cores the interest of IGCP 667 project “World Map of the Orogens”.

Mots-Clés : orogen, subduction, collision, inverted rift, ophiolites, metamorphism, molassic basins, fold and thrust belt...



IGCP 735 (2021–2025): Rocks and the Rise of Ordovician Life: Filling knowledge gaps in the Early Palaeozoic Biodiversification (Rocks n'ROL)

Bertrand Lefebvre ^{1*}, Yves Candela², Khadija El Hariri³, Mansoureh Ghobadi
Pour^{4,5}, Elena Raevskaya⁶, Oive Tinn⁷, Beatriz Waisfeld⁸ & Wenhui Wang⁹

¹ Univ Lyon, Univ Lyon 1, ENSL, CNRS, LGL-TPE, F-69622, Villeurbanne, France

² Department of Natural Sciences, National Museum of Scotland, EH1 1JF, Edinburgh, UK

³ Ecole Normale Supérieure, Cadi Ayyad University, Marrakesh, Morocco

⁴ Department of Geology, Faculty of Sciences, Golestan University, 49138-15739, Gorgan Iran

⁵ Department of Natural Sciences, National Museum of Wales, CF10 3NP, Cardiff, UK

⁶ JSC “Geologorazvedka”, Branch of Russian Geological Holding JSC “Rosgeo” in Saint-Petersburg, 192019, St. Petersburg, Russia

⁷ Institute of Ecology and Earth Sciences, University of Tartu, Faculty of Science and Technology, 50411, Tartu, Estonia

⁸ Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra / Earth Sciences Research Centre (CICTERRA) - National Council for Scientific and Technological Research (CONICET) - National University of Córdoba. Córdoba, Argentina⁹ School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, 410083, Changsha, PR China

Deciphering the complex interactions between climate change, biodiversity and ecosystem structuration is a major societal issue for future generations. The geological record offers the unique opportunity to document the impact of environmental changes in the biosphere in the past, and thus to provide some clues for the future. In this context, the Early Palaeozoic is probably one of the most critical intervals to document such interactions between biotas and the Earth system. This interval embraces major evolutionary events such as the Cambrian Explosion and the Great Ordovician Biodiversification Event, but also major shifts in climate with a dramatic impact on the biosphere. Recently, the development of large-scale collaborative palaeontological databases promoted high-resolution analyses of biodiversity patterns, which could be compared with different environmental proxies. However, most available data are so far strongly biased towards some geographic areas (Europe, North America) and time intervals (lower-middle Cambrian, Middle-Upper Ordovician). Through a multidisciplinary approach, and in close collaboration with the International Subcommittee on Ordovician Stratigraphy, the project aims at filling the numerous knowledge gaps in most regions of the world (e.g. Africa, Asia and South America), with a special focus on less- documented time intervals (e.g. late Cambrian to Early Ordovician).



The Toarcian Oceanic Anoxic Event: Impact on marine carbon cycle and ecosystems (IGCP-655)

Emanuela Mattioli ^{*1}, Matías Reolid ², Luis Vitor Duarte ³, Abbas Marok ⁴

1 Université de Lyon
- France.2

Universidad de Jaén
- Spain

3 Universidade de Coimbra -
Portugal4 Université de

Tlemcen - Algeria

A better understanding of how the Earth System is reacting to past climatic upheavals is essential for predictions about the fate of life diversity and the future of our society. The International Geoscience Program (IGCP), a joint initiative of UNESCO and IUGS, serves as a knowledge hub to facilitate international scientific cooperation in geosciences. One of the strategic themes of the IGCP is Global Change: evidence from the geological record, which perfectly applies to the project IGCP-655, “Toarcian Oceanic Anoxic Event: Impact on marine carbon cycle and ecosystems”.

The Toarcian Oceanic Anoxic Event (T-OAE, Early Jurassic, ~183MA) is considered as a past analogue for ongoing climatic changes. The T-OAE was characterised by an abrupt paleoenvironmental perturbation that included a global warming, a transgression coeval with a widespread deposition of black shales in many epicontinental basins, and a second-order mass extinction. A perturbation of the carbon cycle indicated by a negative carbon isotopic excursion has been documented in both marine and terrestrial material.

The IGCP-655 project (2017-2020) made advance our knowledge of the Toarcian Oceanic Anoxic Event as a result of a collaborative laboratory and fieldwork related to Pliensbachian to Toarcian successions located around the world. A major focus of the collaborative network is the understanding of the causes of the event, with special attention to the impact on marine communities and productivity, the perturbation of geochemical cycles, and the interpretation of environmental conditions and palaeoclimatic changes from geochemistry and fossil record. One of the main issues of this project is about the use of the term Jenkyns Event for characterising this early Toarcian global change that is not limited to an oceanic anoxic event. In fact, anoxia was not generalized and global change affected also emerged areas.

Key words: Jurassic, Jenkyns Event, Global Warming, Biotic Crisis

^{*}Intervenant

The IGCP-659 project Seismic Hazard and Risk in Africa: A hidden hazard in an extreme vulnerable context

Mustapha Meghraoui

Institut Terre et Environnement de Strasbourg, CNRS-UMR 7063, France
<https://igcp-project-659.oaka.fr/>

Assessment of seismic hazards and disaster risks in Africa is one of the important scientific, engineering and political issues. Although the seismic hazard in Africa is moderate in terms of significant magnitude earthquakes, the vulnerability of the African countries even to a moderate event can be high and hence integrated risks could be high. In 2011 a project on development of the Seismic hazard and Risk in Africa (Meghraoui et al., Episodes, 2016), was initiated with the support of the UNESCO-IUGS International Geoscience Program (IGCP), was successfully completed in 2016, and a new project SEISMOSHAF is ongoing until 2023. The seismic hazard assessment and risk mitigation is conducted to comply with the priorities of the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030 (Sendai Framework, 2015).

Previous works were devoted to the building of a databank (satellite images, tectonic and geophysical background, major active faults, active volcanoes, historical and instrumental seismicity, earthquake focal mechanisms, geomorphology and topographic data, geodetic data, tsunamis and their coastal impacts, lithospheric and crustal structures, tomographic data) with harmonization and homogenization of parameters of catalogues, represented by means of a GIS platform under an ArcGIS sub-project for all African countries.

The overall goal of the project is to develop a scientific basis for seismic hazard and risk mapping of African countries and the entire continent using modern assessment methods and vast observational data sets, and to build capacity in the African countries in seismic hazard and risk assessments. A project on the establishment of a seismological centre in Africa is in preparation.

Key words: Seismotectonics, seismic hazard, seismic risk, Africa, IGCP-659

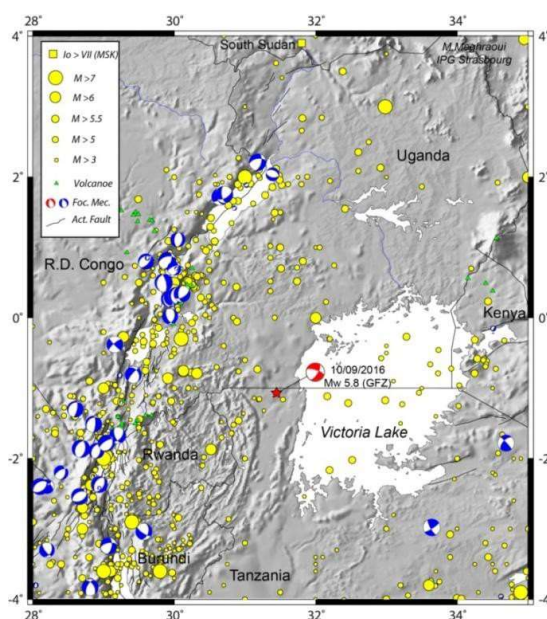


Figure 1: Regional seismotectonic map of eastern Africa and the site of the 10th September 2016 Kagera earthquake (Mw 6.5). The seismicity and tectonic database is



from Meghraoui et al. (Episodes, 2016).



IGCP 635 (2016-2021): The onset of the Great Ordovician Biodiversification Event (GOBE)

Thomas Servais^{1*}, David A.T. Harper², Olga T. Obut³, Christian M.O. Rasmussen⁴,
Alycia L. Stigall⁵ & Yuandong Zhang⁶

¹CNRS, Université de Lille, UMR 8198 Evo-Eco-Paléo, F-59000 Lille, France

²Department of Earth Sciences, Durham University, Durham DH1 3LE, UK

³A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Pr. Akademika Koptiyuga 3, Novosibirsk, 630090, Russia.

⁴Natural History Museum, University of Copenhagen, 1350, Denmark.

⁵Department of Geological Sciences, Ohio University, Athens, 45701, USA.

⁶Nanjing Institute of Geology and Palaeontology. 39 East Beijing Road, Nanjing 210008, China.

The ‘Great Ordovician Biodiversification Event’ (GOBE) comprises the rapid diversification of marine organisms during the Ordovician Period. It is now clear that this adaptive radiation started for some organisms already in the late Cambrian and continued for others beyond the end of the Ordovician, making the GOBE the sum of a number of diversifications that completely modified marine food webs and that, for the first time in geological times, established modern marine ecosystems. The project IGCP 635 focuses on interdisciplinary investigations, including case studies from international sites, involving specialists from the fields of palaeontology, sedimentology, stratigraphy, geochemistry, palaeoceanography, palaeoclimatology, etc., in collaboration with the Subcommittee on Ordovician Stratigraphy (SOS). The results of the project contribute to the understanding of the triggering causes of the establishment of modern marine ecosystems, but also to the identification of the reasons of the first collapse of these environments during the Late Ordovician mass extinction. The project involves scientists from all over the world, and through the organization of dedicated workshops, integrates graduate and doctoral students, in particular from developing countries. Running from 2016 to 2020, the project is on extended term during 2021, and will be succeeded by IGCP 735 (2021–2025): Rocks and the Rise of Ordovician Life: Filling knowledge gaps in the Early Palaeozoic Biodiversification (Rocks n’ROL).

Key-words : Ordovician, biodiversification, radiation, GOBE



A

Abad Isabel.....	583
Abasq Léna.....	814
Abd Elmola Ahmed.....	375
Abecassis Sarah.....	175
Abizar Jugurta.....	653
Abraham Romain.....	662, 663
Abramovich Sigal.....	761
Acremont Elia d'.....	90, 165, 250
Adam Claudia.....	253
Adatte Thierry.....	575, 592, 606, 610, 611, 614, 617, 629, 630, 753, 761
Addad Ahmed.....	723
Adebayo Michael.....	247, 602
Ader Magali.....	862
Adlakha Vikas.....	773
Adnet Sylvain.....	517, 716
Adrien Jérôme.....	730
Afenzar Abdelkrim.....	658
Afifi Abdulkader.....	144, 149
Afilhado Alexandra.....	161
Afonso Juan Carlos.....	265
Agard Philippe.....	138, 172, 173, 188, 200
Agate Mauro.....	166
Agrinier Pierre.....	164, 387
Agrusta Roberto.....	277
Aguado Roque.....	622
Aguilar Julio.....	404
Ahmed Yaaqoub.....	43
Ahmed Zaid Iddir.....	653
Ainsworth Nigel Richard.....	584
Airaghi Laura.....	548, 772
Ait Baha Abdelkarim.....	78
Ait-Itto Fatima-Zahra.....	604
Aizprua C.....	201
Akame Joseph M.....	271
Akther Syed Humayun.....	184, 347
Al Reda Mustafa.....	96
Alaoui Chaimae.....	220
Alaoui Khadija.....	772
Albalat Emmanuelle.....	453, 523
Albarède Francis.....	420
Alberti Matthias.....	628
Albore Livadie Claude.....	417
Alboussière Thierry.....	267, 277
Alexandre Anne.....	601
Al-Husseini Moujahed.....	589
Ali Asghar.....	41
Ali Khoudja Sid Ahmed.....	641
Alix Ombeline.....	21
Allain Ronan.....	725, 738
Allanic Cécile.....	87, 89, 101, 155, 358, 359, 684, 841, 853
Allard Maël.....	76, 77
Allard Thierry.....	53, 830

Allègre Vincent.....	773
Allemand Pascal.....	245, 395
Allier Delphine.....	852
Allouti Salim.....	391
Almar Rafael.....	477
Alsaif Manar.....	174
Al-Suwaidi Aisha.....	586, 755
Altiner Demir.....	617
Amédéo Francis.....	613
Ameri Sara.....	123, 809, 810
Amiot Romain.....	518, 520, 526, 725, 729, 750, 870
Ampuero Jean-Paul.....	365
Amri Isma.....	78
Ancrenaz Arthur.....	591
André Pauline.....	105, 317
Andreani Muriel.....	452, 453, 454
Andreu Bernard.....	758
Andrieu Simon.....	89, 208, 378, 643, 644, 766, 861, 862
Angiboust Samuel.....	193
Angrand Paul.....	10, 11, 143
Anguy Yannick.....	774
Annen Catherine.....	61
Anquetin Jérémy.....	733, 745
Ansanay-Alex Salomé.....	571
Anselmetti Flavio S.....	319
Antheaume Ingrid.....	453, 571, 573
Antics Miklos.....	378
Antoine Clémentine.....	273
Antoine Pierre.....	840
Antoniou Varvara.....	245
Aochi Hideo.....	359
Araya Karen.....	632
Arbaret Laurent.....	64, 380
Arcay Diane.....	175, 179, 189
Argento Pierre-Antoine d'.....	298
Arhror Myriam.....	562, 567
Aribowo Sonny.....	497
Aridhi Kais.....	147, 166
Aridhi Sabri.....	166
Ariztegui Daniel.....	573, 593, 640
Armandine Les Landes Antoine.....	359
Arnal Grégoire.....	142
Arnaud Fabien.....	286, 333, 823, 829
Arnaud Nicolas.....	31, 54
Arnaud-Godet Florent.....	517, 621
Arnould Maëlis.....	258
Aroskay Adeline.....	62
Arroucau Pierre.....	366, 370
Asatryan Gayané.....	694
Aslanian Daniel.....	161, 170, 268, 672, 674, 675, 713
Assayag Nelly.....	862
Assemet Alexandre.....	517
ASTER Team.....	289, 294, 501, 838
Asti Riccardo.....	143
Atik Asma.....	665



Aubourg Charles.....	27, 98, 157, 651
Audin Laurence	361, 367, 369, 370, 408, 838, 846, 871
Auger Pascal.....	338
Augier Romain.....	193, 194
Aumaître Georges	294, 838
Aung Day Wa	645
Authemayou Christine	226, 497, 650
Averbuch Olivier.....	93, 146
Avgitas T.	412
Avoine Jacques.....	793
Ayarzagüena Mariano	420
Ayral Pierre Alain	813
Azdimousa Ali.....	31
Azzam Fares	375
Azzaoui Nourddine	71

B

Babonneau Nathalie	594
Baby Guillaume.....	50, 55, 144, 149, 684, 685, 686, 691
Bacchiana Claude	803
Bachèlery Patrick	688
Bachiri Taoufiq Naima	222
Baele Jean-Marc.....	129, 130
Bahain Jean-Jacques	502, 865
Bai Mingkun	34
Baillet Laura	793
Bailleul Julien	146, 654
Bailly-Maître Marie-Christine.....	409
Bailon Salvador	728
Bain Olivier.....	425
Baize Stéphane.....	105, 362, 363, 365, 369, 370, 373, 843
Bajbouji Marouan	825
Bajolet Flora	168
Bakke Jostein.....	286
Balansa Jocelyn	832, 833
Balcone-Boissard Hélène	67, 74
Balestrieri Maria Laura.....	58, 292
Bali Eniko	72
Ball Philip	153
Ballas Grégory.....	92, 217, 219, 782
Ballato Paolo	43
Ballesteros Daniel	444, 502
Ballèvre Michel	24, 115, 126
Ballmer Maxim	277
Ballu Valérie	184
Balseiro Diego	718
Baltazart Karl.....	715, 734
Balter Vincent	1, 519, 521, 523, 714, 725
Baltzer Agnès	211, 494
Balvay Mélanie	34, 45
Banfield Wesley	238
Banjan Mathilde.....	313
Banks William	710
Baptiste Julien.....	529, 544, 684, 685, 686, 691
Baratelli Fulvia.....	814
Barba Diego.....	177

Barbarand Jocelyn.....	29, 88, 96, 168, 375, 377, 387, 643, 766
Barbel Héloïse	430, 445
Barbier Quentin	314
Barbier Samuel.....	453
Barbolini Natasha.....	638
Bard Pierre-Yves	112
Bardin Jérémie	605
Bardoux Gérard.....	387
Barhoun Nadia	222, 676, 677
Barou Fabrice	76, 119, 849
Barr W. Andrew	712
Barré Guillaume	376, 568
Barreyre T.	245
Barrier Laurie	560
Barrier Pascal.....	345
Barruol Guilhem.....	7, 287
Barry Cillian	587
Bartier Danièle.....	391
Bartolini Annachiara.....	616, 754
Bary Mathilde	242
Bascou Jérôme.....	287, 293, 335
Basile Christophe	154
Bassetti Maria-Angela	594
Bassinot Franck	247
Bastante José	408
Bataillard Philippe	340
Batenburg Sietske J.	604
Battaglia-Brunet Fabienne	336
Battani Anne	377
Baudement Cécile	314
Baudet Daniel	723
Baudin François.....	570, 579, 607, 613, 623, 626, 635, 793
Baudin Thierry.....	87, 101, 532, 539
Bault Valentin	718
Baumann Juliette	316
Baut Jean-Paul	857
Baux Noémie.....	474, 481, 483
Bayez Kani.....	517
Bayon Germain	630
Bazargan-Sabet Behrooz	359
Bea Fernando.....	37
Beaudit Mathis.....	559
Beaudoin Nicolas E.	86
Beaufort Daniel.....	212, 375, 390, 830
Beaufort Luc.....	702
Beauval Céline	107, 112
Becar Tiffany	351
Beccaletto Laurent.....	93, 223, 224, 233, 385, 635, 764, 853
Beck Elise	804
Becker M.	347
Becker Thorsten	155
Bedell Jean-Philippe	330
Beek Peter van der.....	36, 45
Bégeot Carole	442
Bégorre Céline	330
Bekki Slimane.....	62
Belevedere Matteo.....	709
Belhâï Djelloul	310



Belkebir Lahcene	665
Belkhedim Salim	628
Bellahsen Nicolas	12, 18, 155, 506, 548, 772, 841
Bellanger Mathieu	48, 56, 380
Bellenfant Gael	338
Bellier Olivier	58, 501, 678
Bellier Vincent	544
Bellot-Gurlet Ludovic	411
Below Béatrice	605
Ben Abed Aïcha	436
Ben Aissa Lassaad	768
Ben Aissa Rania	768
Ben Aissa Wiem	768
Ben Haj Amara Abdessalem	768
Ben Haj Slama Selma	147
Ben Moussa Abdelkhalak	31
Benamara Asmahane	606
Benavente Escóbar Carlos	408
Bendahou Brahim	812
Bendaoud Abderrahmane	129, 130
Benedetti Lucilla	501
Benedicto Antonio	29, 33, 377
Benhamou Miloud	628
Benjelloun Mouna	560
Benkaddour Yacine	812
Benmammar Anissa	129, 130
Benmansour Sana	758
Benoît Laurent	485
Bensadok Abderrahmane	663
Bensallam Saad	825
Benzerara Karim	275
Bergel Shelly	645
Berger Jean-François	330
Berger Julien	116, 129, 130
Bergsma Erwin	477
Berlitz Emilie	706
Bernachot Isabelle	541, 543, 864
Bernadou Fabien	274
Bernard Julien	59, 541
Bernard Karine	351
Bernardet Karim	829
Bernárdez Enrique	614
Bernet Matthias	18, 232, 293, 839
Bertauts Maxime	131, 850
Berthier Célestine	530
Berthier Eric	557
Berthier Etienne	294, 315
Berthod Carole	66, 688
Bertin Clotilde	59
Bertrand Catherine	816, 836
Bertrand Guillaume	301, 546, 816
Beslier Marie-Odile	152, 182, 212, 837
Besse Jean	240
Bessedik Mostefa	637, 665
Bessière Eloïse	193
Bessin Paul	295, 529, 535, 684, 685, 686, 691, 854
Bétard François	294
Béthoux Olivier	730, 731

Betka Paul M.	184
Beyssac Olivier	458
Bez Martine	847
Bhat Harsha. S.	186
Bhury Najat	445
Bialkowski Anne	538, 543
Biari Youssef	183, 187
Bichet Vincent	449, 592
Bienvegnant Dorian	834
Bièvre Grégory	352, 353, 431
Bignon-Lau Olivier	406
Biguenet Maude	344
Bilau Antonin	834, 835
Billa Mario	301
Billant Jérémy	370, 531
Billerot Audrey	795
Billet Guillaume	733
Billy Isabelle	829
Biot Vincent	794
Bisch Alex	116
Bishop Kevin	826
Biteau Jean-Jacques	204
Bitri Adnand	358, 359, 385, 817
Blaise Thomas	29, 208, 375, 377, 387, 641, 644, 766, 839
Blanc Nils	549
Blanc Philippe	769
Blanchard Nicolas	432
Blanchenet Anne- Marie	552
Blanpain Olivier	242
Blard Pierre-Henri	289, 633
Blein Olivier	769
Bletery Quentin	186
Blichert-Toft Janne	420
Blond Ninon	433
Blondel Cécile	706
Blondet Justine	607, 630, 863
Bocherens Raphaël	564
Bodet Ludovic	678
Bodin Stéphane	576, 580, 614
Bodin Thomas	111, 265
Bögels Tim	465
Boiron Marie-Christine	379
Boisserie Jean-Renaud	707, 711, 714
Boivin Clément	836
Boka Mene Molly	384
Bolfan-Casanova Nathalie	256
Bollinger L.	370
Bolou-Bi Emile	826
Bolrão Daniela P.	277
Bolton Clara	237, 238, 247
Bomou Brahimsamba	575, 592
Bonjour Eric	54, 57
Bonnel Cédric	27, 98, 157
Bonnet Guillaume	117, 200
Bonnet Stéphane	487, 503
Bonno Michael	48, 56
Bordenave Aurélien	142
Borensztajn Stéphan	452



Borraccini Francesco	656
Bory Aloys	525
Bosc Noémie	642
Bosc Rémi	530
Bosch Delphine	201, 213, 337
Boschetti Louise	834
Bosse Valérie	115, 124
Bossennec Claire	388
Bossis Rémi	498
Bouat Loïc	376, 559
Boucard Milton	156, 187, 191
Bouchard Frédérique	55
Bouche Alexandre	656
Boucher Fabien	418
Boucher Florian	232
Bouchet Mathilde	743
Bouchez Camille	819
Bouchez Julien	823
Bouchon Michel	360
Boudagher-Fadel Marcelle	152, 688
Boudet Nathalie	549
Boudon Georges	67, 70, 74
Boudouma Omar	623
Boué Danny	613
Bougeault Cédric	624
Bougouin Alexis	63
Bouhifd Ali	264, 274
Bouilhol Pierre	118, 181
Bouju Valentine	746
Boukadi Nouredine	40
Boukari Claire	88
Boukra Amine	562, 566, 567
Boularand Sarah	156
Boulard Eglantine	261
Boulet Pierre	693
Boulila Slah	752, 753, 754
Boulvais Philippe	119, 145, 151, 244
Boulze Hugo	176
Boumbouet Gireau	391
Bounaceur Roda	568
Bour Olivier	295, 819
Boura Anaïs	750
Bouramtane Tarik	16
Bourbon Pierre	320
Bourdelle Franck	327, 548
Bourgais Matthieu	444
Bourgeois Renaud	738
Bourgeois Olivier	295, 355, 591
Bourillot Raphaël	206, 207, 563, 649
Bourlès Didier	846
Bourquin Sylvie	156, 223, 233, 635, 747, 764
Bousquet Bruno	458
Bousquet Romain	872
Bouterin Bernard	784
Bouton Anthony	649
Bout-Roumazeilles Viviane	525, 657
Bouvard Manon	796
Bouziat Antoine	510, 797

Boy Jean-Paul	269
Bozzinio Júlia	531
Bracquart Elodie	608
Braissant Olivier	563, 649
Brall Niels	593
Branquet Yannick	119, 145, 151, 244, 376
Braucher Régis	289, 591, 838, 846
Braun Jean	505, 508
Brayard Arnaud	748, 749
Brazier Jean-Michel	575
Brédy Patricia	298
Bremaud Vincent	366
Brenot A.	394
Bres Julia	609
Briais Justine	32, 50, 96, 99, 155, 358, 506, 535, 684, 685, 686, 691, 852, 858, 859, 860, 861, 862, 863
Briard Justine	752
Brigaud Benjamin	89, 206, 207, 208, 375, 377, 378, 387, 563, 641, 643, 644, 766, 834, 835, 861, 862
Brkojewitsch G.	446
Brockmann Patrick	565
Brocks Jochen J.	723
Broise Henri	436
Brosse-Quilgars Corinne	562, 567
Brossier Romain	845
Brouand Marc	389
Broussard Cédric	551
Broussaud Marie-Josée	807
Brown Morgan	714
Brown Stephen	89, 853
Bruand Emilie	124, 273, 282
Bruguier Olivier	129, 130, 213, 293
Bruneau Ludovic	607, 613, 863
Brunel Maurice	782
Brunet Fabrice	397, 400
Buatier Martine	830
Buck W. Roger	184
Buee Hélène	404
Buffa Valentin	735, 736
Buffat Loïc	332
Bulois Cédric	100, 177, 872
Bundeleva Irina	649
Buoncristiani Jean-François	317, 600
Bürckel Pierre	74
Burgisser Alain	61
Burklé-Vitzthum Valérie	568
Burnol André	359
Butek Juraj	254
Button M.	200

C

Cadel Emmanuel	550
Cadenas Patricia	23
Caffe Pablo	390
Cagnard Florence	132, 532, 539, 849
Caillaud Alexis	570



Caillaud Jacinthe	31, 324, 525
Calassou Sylvain	14, 26, 153, 629, 669, 685, 686, 691
Calcagno Philippe	536, 845
Calderón Mauricio	127
Cali José	559
Callec Yannick	545
Callot Jean-Paul	86, 91, 94, 841
Callot Yann	433
Calmels Damien	377
Calvat Pascal	829
Camerlynck Christian	678
Camps Pierre	337, 690
Candela Yves	873
Canva Albane	837
Cao Kai	44
Capar Laure	358
Capirala Ashika	645
Cappoen Vincent	314
Capron Alexis	666, 681
Cara Michel	798
Caracas Razvan	465, 471, 472
Caracciolo Alberto	72
Carcaillet Julien	293, 317, 600
Cardellini Carlo	522
Cardinal Thibaut	838, 846
Cardon Hervé	453, 454
Caritg Séverine	320
Caritg-Monnot Séverine	28, 367, 832, 833
Carlin William	397
Carlsson Veronica	693
Caro Guillaume	616
Caroir Fabien	146
Caron Vincent	654
Carozza Jean-Michel	439
Carpentier Cédric	225, 641
Carretier Sébastien	487, 498, 503
Cartannaz Charles	545
Carter J.	463
Cascales-Miñana Borja	722
Casetta Marine	324
CaSSIS team	462
Castelltort Sébastien	96, 181, 508, 629, 685, 686, 691
Cathelineau Michel	379, 389
Catinat Maxime	378
Cattò Silvia	292
Caudron Corentin	321
Caupin Frédéric	593
Caurant Clara	178
Čaušević-Bully Morana	449
Causse Louis	425
Cavailles Thibault	210, 213, 457, 648, 773, 774
Cavalié Olivier	367
Cavazza William	677
Cavelan Amélie	326
Cavero Julien	294
Cavin Lionel	750
Cayla Nathalie	799
Cazzola Carlo	666, 681

Cerdan Olivier	815, 821, 822
Cerpa Nestor	179
César Camila	461
Cesbron Florian	494
Chabard Dominique	730
Chabaux François	288
Chablais Jérôme	700
Chabraborty Tapan	30
Chader Adem-Ilyes	814
Chadi Mohammed	102
Chagué Catherine	316
Chaize Brian	435
Chaljub Emmanuel	515
Chalmin Emilie	406
Chalouan Ahmed	13, 37
Chambodut Aude	515
Chamot-Rooke Nicolas	246, 837
Champagne Julie	142
Champallier Rémi	64, 194
Champilou Jean-Baptiste	211
Champollion Cédric	470
Chanard Kristel	197
Chanier Frank	146, 160, 654, 671
Chantel Julien	263
Chanvry Emmanuelle	55
Chaptal Corentin	654
Charbonnier Guillaume	606, 608, 610, 611, 752, 753
Charbonnier Sylvain	526, 661, 727, 730, 740, 748, 777, 778
Charles Nicolas	307, 533
Charlier Bernard	116
Charpentier Delphine	48, 830
Charrassin Raphaëlle	294
Charreau Julien	633
Charrondière Jules	730
Charton Joanna	289, 294
Chassin de Kergommeaux Aurélie	406
Châteauneuf Jean-Jacques	857
Chatti Yosra	147
Chaumillon Eric	316, 344, 489
Chauveau Denovan	226, 650
Chauvet Alain	282, 284
Chavasseau Olivier	710
Chefdeville M.	412
Chen Yue	44
Chêne Frédéric	543, 864
Chenin Pauline	23
Cheong Dae Kyo	870
Cherchi Francesca	857
Cherfils Jean-Baptiste	500
Chevalier A.	412
Chevalier Marie-Luce	34, 108, 773
Chevet June	190, 290, 291
Chevrot Sébastien	26
Chiaradia M.	201
Chikwanda Paul	81
Chiodini Giovanni	522
Chiquet Pierre	399
Chirol Bernard	678



Chirol Hugo	208
Chlieh Mohamed	360
Chopin Christian	37, 117
Chourio-Camacho Diana	387, 854
Christol Aurélien	435
Christophe Lécuyer	54
CIRIR Consortium	805
Cirrincone Rosolino	82
Claisse Pauline	327
Clarens Philippe de	170
Claussmann Barbara	654
Clauzel Thibault	518
Clavé Elise	458
Clementucci Romano	43
Clerbois S.	446
Clesse D.	511
Closset Luc	856
Clozel Blandine	338
Cochelin Bryan	282
Cocquerez Théophile	527
Cogné Nathan	119, 228, 236
Cohu A.	412
Cokelaer François	510, 797
Colas Bastien	322
Colin Frédéric	414
Colleoni François	814
Collett Stephen	46
Collin Louis	816
Collot Jean-Yves	90
Colombano Stéfan	326
Colombié Claude	642, 839
Coltat Rémi	145, 151, 244
Coltice Nicolas	136
Combaudon Valentine	48
Combey Andy	361, 408
Company Miguel	622
Compère Philippe	723
Consortium collection d'objets 3D SGF	789
Conway Susan J.	355, 460, 461, 462
Cooper Samuel L. A.	577
Copard Yoann	565
Coppo Nicolas	384, 385
Coquery Marina	328, 329, 339
Coquinot Yvan	416
Cordier Carole	20, 81
Corentin Pauline	630
Cornard Pauline	655
Cornée Jean-Jacques	179, 182, 212, 225, 690
Cornet Christophe	797
Cornet Yohan	723
Cornille Vincent	324
Cornou Cécile	361
Corrêa Iran C. S.	243
Corsini Michel	13, 17, 31, 37
Corti Giacomo	167
Corti Luca	84
Cortiadé Nicolas	290
Cortopassi Roberta	411

Cosca Michael A.	230
Coskun O.	245
Cossart Étienne	435
Costa Stéphane	356, 481, 486, 488, 490
Coster Pauline	709
Costin Gabi	256
Cottard Christine	807
Cotte Nathalie	192, 195, 197
Cottin Jean-Yves	290, 291
Cottle John	41, 200
Couapel Martine	601
Couchoud Isabelle	507
Couëffé Renaud	18, 53, 168
Couhert Alexandre	269
Couillet Armelle	444
Counts John W.	688
Courboux Françoise	364, 365
Courcot Lucie	324
Courgeon Simon	688
Courrier Thomas	534
Courrioux Gabriel	28, 87
Cousin Agnès	459
Coutterand Sylvain	798
Couziné Simon	118
Coyne Alexandra	330
COYOTES Team	371, 372
Crasquin Sylvie	696
Crayol Eléa	811
Cremenose Gabriele	462
Cresseaux Juliette	180
Crônier Catherine	718
Crosta Xavier	829
Crouzet Christian	313, 353, 600
Crumeysolle Philippe	847
Cruset David	33
Cucurullo Alessia	320
Cuisinier Edmée	814
Cuitiño José	484
Cuny Gilles	729
Curie Julien	436
Cury Leonardo	127
Cuvilly Fabien	550

D

D'Agostino Nicola	112
D'Augustin Thiébaud	74
Da Silva A-C.	446
Da Silva Julio	549
Dabrin Aymeric	328, 330, 339
Daëron Mathieu	581, 621
Daffos Camille	64
Dahl Tais W.	759
Dal Zilio Luca	186
Dalaison Manon	106, 512
Dall'asta Nicolas	148
Dall'Asta Massimo	248



Danciu Laurentiu.....	107
Danelian Taniel	693, 694, 697, 719
Daniel Isabelle.....	263, 452, 453, 454, 455
Danoix Frédéric.....	550
Danoix Raphaële.....	550
Danzelle Julien	608, 626
Daril Norman.....	32
Daryono Mudrik R.	497
Daux Valérie.....	725
Davaille Anne	155, 253
Davarzani Hossein	326
Davaux Mélanie	378
David Gaël.....	459
David Pierre-Yann	817
Daviero-Gomez Véronique.....	750
Davies D. Rhodri	174, 259
De Gelder Gino	226, 650
De Junet Alexis.....	331
De Leeuw Arjan.....	36, 103, 232
De Michele Marcello	315
De Min Lyvane	182
De Wever Patrick	806
Debaille Vinciane.....	271
Debayle Eric	265
Debret Baptiste.....	178, 181
Deconinck Jean-François.....	613, 624
Defaflia Nabil.....	653
Defive Emmanuelle.....	591
Deflandre Bruno	495
Deguen Renaud.....	277
Dehouck Erwin	459, 463
Dekoninck Augustin	684
Del Piero Nicolo	700
Delacour Adélie.....	190, 290
Delaere Christophe	431
Delannoy Jean-Jacques	406
Delarue Frédéric.....	565
Delattre Marion	662, 663
Delaunay Antoine.....	144, 149
Delaunay Delphine.....	796
Delbart Célestine.....	821
Deldicque Damien	172
Delescluse Matthias	246, 837
Delhaye-Prat Vincent	163, 248, 746
Delile Hugo.....	329, 330, 437
Deline Philip	286
Delisle François	444
Dellai Nessrine	470
Delmas Doriane.....	213
Delouis Bertrand	365, 369
Deloule Etienne.....	74, 256, 409
Deloume-Carpentras Quentin.....	89, 643, 644
Delpech Guillaume.....	289, 291
Delplanque Anne.....	782
Delqué-Količ Emmanuelle.....	411
Delrieu Fabien.....	438
Dem'Eaux Thau, équipe scientifique.....	216, 217
DEM'EAUX Thau, équipe scientifique	215

Demarchi Beatrice.....	419
Demory Francois.....	313
Demory François	22, 470
Demouchy Sylvie.....	259
Demoulin Catherine F.	723
Dendievel André-Marie.....	329, 330, 438
Denèle Yoann.....	150
Denis Alain	856
Deparis Jacques.....	326
Deprez Aline.....	373
Derdour Abdessamed	812
Derenne Sylvie	661
Derkaoui Aicha.....	169
Deroin Jean-Paul.....	409
Derycke Alexis.....	51, 228
Deschamps Pierre.....	571, 834, 835
Deschamps Rémy.....	206, 207
Deschamps-Ostanciaux Emilie.....	511, 515
Desgué Célestin.....	481
Deslandes Jean-Pierre.....	261
Desmares Delphine	605
Desormeaux Clément	501
Despinois Frank.....	165, 379
Desrochers André	625
Desroziers Sylvain	510, 797
Dessa Jean-Xavier	837
Detienne Lydia.....	806
Devau Nicolas	340
Develle Anne-Lise	313, 319
Déverchère Jacques.....	154, 837
Devidal Jean-Luc	273
Devienne Philippe	693
Deville Eric.....	218, 398, 402
Devos Alain	423, 855
Dewez Thomas.....	320, 348, 487
Dezileau Laurent	632
Dhahri Ferid	40
Dherret Lysiane.....	339
Di Carlo Ida	198
Diab Hamida	475
Diallo Aboubacry.....	525
Diamant Michel	511, 515
Dias Nuno.....	161, 170
Dibarbouré Gérald.....	513
Didier Benoît.....	666, 681
Didier Gilles.....	712
Didon-Lescot Jean-François	813
Diener Johann	282
Dietrich Pierre.....	49, 52
Dieudé Pascaline.....	339
DiMuro Andrea	66
Dinies Michele	601
Diot Hervé.....	116
Diraison Marc.....	388, 391
Dissard Delphine	605
Divies Renaud	510, 797
Djeffal Rami.....	102
Do Couto Damien	659, 676



Doan Mai-Linh.....	196
Dodat Pierre-Jean	519
Dofal Anthony.....	7
Doin Marie-Pierre	34, 105, 108, 112, 180, 317, 511
Doligez Martin.....	182
Domergue Jean-Marc.....	813
Donadieu J.....	511
Donizeti de Oliveira António.....	579
Donnadieu Yannick	235, 237, 238, 638
Donniol Bénédicte	107
Dornel Loïc	531
Dörr Wolfgang.....	525
Dobre Cécile.....	110
Doucouré Moctar	713
Dromart Gilles.....	458, 533, 667, 678
Droxler André.....	646
Druguet E.	79
Duarte Luis Vitor.....	579, 874
Dubacq Benoît	172, 188, 200, 548, 772
Dubar Michel.....	670
Dubied Morgane	708
Dubois Frederic	385
Dubois Michel	119
Dubuffet Fabien	277
Dubus Armand	299
Ducassou Céline	233, 764
Ducassou Emmanuelle.....	493, 646, 647, 657
Duchêne Stéphanie	129, 254
Duclaux Guillaume	135, 287, 293, 501
Ducoux Maxime	14
Dufresne Philippe.....	417
Dugamin Elza.....	379
Duguet Timothée	490
Duhamel Anaïs	520
Duhamel-Achin Isabelle	131, 850
Dumarçay Gaëlle	406
Dumas Christophe.....	240
Dumbery Mathieu	269
Dumont Thierry.....	834, 835
Duni Llambro.....	113
Duny Anne.....	438
Dupaigne Timothée.....	852
Duperret Anne	363, 481, 488, 490
Duperron Maria	484
Dupont Catherine.....	422
Dupont-Nivet Guillaume	20, 236, 237, 238, 638, 645
Dupraz Christophe	649
Dupré S.	218
Duputel Zacharie.....	186
Dupuy Quentin.....	211
Duquesne Amélie.....	439
Durand Aline	418
Durand P.....	511
Durand Véronique.....	377, 862
Duret Floriane	530
Duron Jérôme	532
Dushi Edmond.....	113, 560
Dusséaux Camille	119, 227

Dutay Jean-Claude	620
Duteil Thibault	563, 649
Duvail Cédric	678
Duval Florian	122
Duwiguet Hugo.....	380
Dyment Jérôme.....	149

E

Ebner Ronja.....	680
Eddy Michael P.....	761
Egal Emmanuel	533, 667
Eglinger Aurélien.....	530
Egoroff Grégoire	806
Ehrhold Axel	476
Eirikh-Rose Anna.....	416
El Adraoui Abdessamad	16
El Bakili Asmae	13
El Hariri Khadija	873
El Kadiri Khalil	78
El Mendili Anas.....	557
El Ouali Mohamed	580
Elair Chaima	318
Elbez Hammouda	693
Elles S.....	412
Elrick Maya.....	625
Emmanuel Laurent.....	422, 857, 860
Enjelvin Noële	326
Erdmann Saskia	198
Escartín Javier	245, 251, 531
Esnault Johanne	746
Espurt Nicolas.....	100, 177, 832, 833, 839
Essaifi Abderrahim.....	43
Essamoud Rachid	658
Etienne David.....	447
Eude Adrien	15
Evain Mikael.....	161, 170, 187
Evans David.....	81
Expedition IODP 358 science team.....	196
Ezenwaka Kingsley	183

F

Fabbri Stefano C.	319
Fabre Cécile.....	331, 458
Fabre Emmanuel.....	709
Fabre Sébastien	487
Fabregas Natacha	648
Faccenna Claudio	58, 155
Fadel Alexandre	723
Falconnet Jocelyn.....	735
Famin Vincent	198, 199, 229, 542
Fanning Mark	127
Fantasia Alicia	576, 580, 614
Fara Emmanuel.....	749



Farah Aboubaker.....	37
Farasin Julien.....	819
Fargetton Tiphaine.....	397
Faubert Léa.....	646
Fauchadour Jean-Christophe.....	358
Fauquembergue Kelly.....	647
Fauquette Séverine.....	50, 615, 637, 682
Faure Agathe.....	841
Faure Michel.....	844
Faure Pierre.....	326, 572
Favier Alexiane.....	213
Favier Vincent.....	289, 294
Fazio Eugenio.....	82
Fedorik Jakub.....	144, 149
Fellah Clémentine.....	452, 453
Féniès Hugues.....	206, 207, 563
Fenies Pierrick.....	594
Feraïlle Mathieu.....	510, 797
Fernández-Blanco David.....	226
Fernandez Vincent.....	575
Ferrant Marie.....	411
Ferrazzini Valérie.....	65
Ferré Ghyslain.....	559
Ferreira Christian dos Santos.....	655
Ferreira Jorge.....	614
Ferreira Sanchez Dario.....	723
Ferrier K.....	347
Ferrière Jacky.....	146
Ferry Jean-Noël.....	55, 570
Ferry Matthieu.....	369, 370
Feuillet Nathalie.....	371
Fiallo Marina.....	341
Fiannacca Patrizia.....	82
Filippi Marco.....	17
Fillon Charlotte.....	32, 55, 88, 96, 99, 629, 684, 685, 686, 691
Finnegan Seth.....	625
Fisher Donald.....	198, 199
Fizaine Florian.....	300
Flandrois Jean-Pierre.....	518
Flaux Clément.....	332
Flehoc Christine.....	860
Fleitout Luce.....	176
Fleury Jules.....	501, 789
Fleury Marc.....	378
Flipo Nicolas.....	814
Florent Essou Codjo Thomas.....	378
Fluck Pierre.....	442
Fluteau Frédéric.....	237, 238, 240, 279, 620, 638
Folie Annelise.....	728, 780
Föllmi Karl B.....	606, 610, 611, 753
Fondrillon Mélanie.....	428
Fonseca Carolina.....	579
Fontaine Fabrice R.....	7
Font-Ertlen Marianne.....	355
Fontugne Christophe.....	557
Ford Mary.....	10, 26, 97, 633
Forel Marie-Béatrice.....	695, 696, 727, 740, 742, 748, 779
Forest Vianney.....	422

Forni Olivier.....	458, 459
Fort Julien.....	769
Fosdick Julie.....	127
Fouché Stéphane.....	575
Fougerouse Denis.....	128, 556
Foulquier A.....	342
Foumelis Michael.....	359
Fourel François.....	518, 725
Fournier Alexandre.....	413, 415
Fournier François.....	156, 636
Fourtet Colin.....	288
Fowler Mike.....	273
Fox Matthew.....	32
France Lydéric.....	83
François Benjamin.....	356
François Camille.....	723
Frasca Gianluca.....	97, 686, 691
Frati Giovanni.....	559
Freslon Nicolas.....	630
Fressard Mathieu.....	435
Fréville Kevin.....	849
Frey Eberhard.....	736
Frigola Clément.....	594
Frochot Alycia.....	15
Fronteau Gilles.....	800, 855
Fucelli Andrea.....	700
Fuck Reinhart.....	161
Fullgraf Thomas.....	120
Fumagalli Patrizia.....	202
Furic Renan.....	530

G

Gabelotaud Isabelle.....	477
Gaborieau Cécile.....	774
Gailhard J.....	394
Gaillard Fabrice.....	274, 307
Gaillard Thierry.....	862
Gaillardet Jérôme.....	823
Gailleton Boris.....	504
Gaillot Arthur.....	821
Gaina Carmen.....	251
Galabertier Bruno.....	829
Galbrun Bruno.....	752, 754
Galer Stephen J. G.....	597
Galin Valérie.....	345
Galipaud Jules.....	452
Gallais Flora.....	161
Gallen Sean F.....	229
Gallet Sylvain.....	13
Gallet Yves.....	413, 415
Gallipoli Domenico.....	320
Galoyan Ghazar.....	694
Galy Albert.....	22, 787, 847
Gand Georges.....	233, 729, 764
Gandreau David.....	408
Garagnon Julia.....	334



GARANTI Equipe	182
GARANTI Mission	152, 212
Garcia Géraldine	750
Garcia Jean-Pierre	440
Garcia R.	245
Garcia-Castellanos Daniel	680
García-Mayordomo Julián	871
Garcin Yannick	571
Gardien Véronique	54, 57, 116, 119, 376, 593, 768
Gardin Silvia	616, 752, 754
Gardonio Blandine	109
Garel Emilie	524, 811, 818
Garel Fanny	174, 175, 179, 259, 260, 782
Garel M.	521
Garel Sylvain	608
Gargani Julien	346, 393
Garidel-Thoron Thibault de	247, 602
Garlan Thierry	242, 477
Garnier Christophe	320, 348
Garrocq Clément	152, 179, 212
Gärtner Marina	592
Garzanti Eduardo	167
Gascoin Simon	315
Gasnault Olivier	459
Gaspard Danièle	621, 737
Gasser Dorado Julien	378
Gastineau Renaldo	319
Gattacceca Jérôme	470
Gaucher Eric	163, 164, 453, 669
Gaudot Ianis	385
Gaullier Virginie	146, 671
Gautheron Cécile	45, 51, 53, 55, 58, 228, 292, 835
Gautier Pierre	145, 151, 244
Gautret Pascale	336
Gavazzi Bruno	414
Gawthorpe Rob	634
Gay Aurélien	152, 212, 213, 214, 220
Gébelin Aude	119, 227, 230, 231, 239
Gebhardt Catalina	319
Gelin François	651
Gély Jean-Pierre	857
Génault Bertrand	857
Gendry Damien	783
Genevey Agnès	413, 415
Genge Marie	51, 228
Génin Fabien	713
Génuite Kim	502
Geraads Denis	712
Gérard Benjamin	205
Géraud Yves	386, 388, 391
Gerbe Marie-Christine	291
Gervais V.	218
Gerya Taras	193
Ghiglione Matias	127
Ghobadi Pour Mansoureh	873
Gibert Corentin	575, 710
Giguët-Covex Charline	286
Gill Fiona	582

Gillet Hervé	210, 648
Gillet Maxime	813
Gillet Nicolas	269
Gillot Pierre-Yves	522
Gimbert Frédéric	442
Gindre-Chanu Laurent	163
Giovenco Elena	261
Girard Catherine	517
Girard Juliette	493
Girard-Muscagorry Alexandre	410
Giraud Fabienne	784, 839
Giraud Manuel	559
Girardeau Jacques	657
Girault Jean-Baptiste	12, 18, 506
Giret André	291
Gloaguen Eric	546
Glodny Johannes	193
Gloter Alexandre	548
Gobé Jean-François	750
Godano Maxime	365
Godard Vincent	58, 501
Godbillot Camille	595
Godeau Nicolas	834, 835
Godefroit Pascal	750
Godin Jean-Philippe	523
Godinho Elodie	829
Goedert Jean	725
Golfier Fabrice	326
Golovin Alexander	256
Gomez Bernard	725, 750
Gómez-Romeu Júlia	153
Gommery Sarah	115
Goncalves Philippe	849
Goodbred S.	347
Goosse Hugues	294
Gorini Christian	666, 672, 674, 675, 676, 677, 681
Gorintin Louis	404
Gosset Antoine	330
Gosso Guido	38, 39
Got Jean-Luc	65
Gottschalk Julia	597
Gouhier Mathieu	315
Gouin Jérôme	301
Gounelle Aude	720
Gourbet Loraine	229
Gourcerol Blandine	131, 850
Goussard Florent	738
Goussin Fanny	20
Gout C.	218
Goy C.	412
Gracia Francho	98
Gracias N.	245
Grădinaru Eugen	695
Graf Emma	504
Graham Nick	81
Graindorge David	154, 187, 191, 363
Grall Céline	184, 347
Grall Jacques	476



Grand Stéphanie	564
Grandin Raphaël	113, 315, 367, 511, 560
Grandjean Gilles	356
Grandjean P.	245
Grangeon Thomas	815
Granjeon Didier	482
Grard Nadine	813
Grataloup Sandrine	539
Grauby Olivier	31
Graulds Arnaud	399, 629
Graveleau Fabien	146
Gravier Blaise	597
Greff-Leftz Marianne	240
Gregoire Brian	563
Grégoire Gwendoline	341, 474, 476, 478, 481, 483, 486, 488
Grégoire Michel	254, 290, 291, 296
Gremmel Josselin	120
Grenard-Grand Elise	479, 480, 688
Grenier Mattis	15
Gribenski Natacha	600
Grimaud Jean-Louis	854
Grime Romain	656
Grisot Ghislaine	339
Grohé Camille	710, 711
Grolimund Daniel	723
Grosbois Cécile	822
Grosjean Anne-Sabine	575
Grosjean Marion	554
Grossi Vincent	453, 571, 573
Gruat Alexandra	339
Guadelli Jean-Luc	715, 734
Gualandi Adriano	109, 197
Guðfinnsson Guðmundur H.	72
Guédron Stéphane	431
Guenser Pauline	743
Gueriau Pierre	739
Guérin Roger	431
Guerit Laure	505
Guerrot Catherine	848
Gueydan Frédéric	174
Guiastrennec-Faugas Léa	210
Guignot Nicolas	261
Guihou Abel	834, 835
Guillam Elvis	696
Guillaume Damien	288, 289, 290, 291, 296, 335, 671
Guillen Lucie	320, 348
Guillet De Chatellus Foulques	382
Guillevic Floriane	333, 342
Guillier Bertrand	30
Guillin Arnaud	71
Guillocheau François	32, 49, 50, 52, 55, 96, 99, 165, 505, 535, 629, 684, 685, 686, 691, 858, 859
Guillon Théophile	380
Guillot Stéphane	20, 172, 844
Guillou Hervé	763
Guillou-Frottier Laurent	380
Guimpier Anthony	460
Guiomar Myette	841

Guiraud Michel	163, 630
Guitreau M.	273
Gulick Ginny	462
Gumiaux Charles	79, 546, 841
Gündüz Serkan	319
Gunnarsson Robin Jóhann	72
Gurioli Lucia	66
Gutiérrez-Marco Juan Carlos	698
Guy Franck	714
Guyez Anne	503
Guyomard Yaël	322, 543

H

Haas Jean-Nicolas	592
Hacini Messaoud	169
Hacker Bradley R.	46, 117, 133
Hadri Abdessamad	318
Haibing L.	34
Halfon Isabelle	856
Halldórsson Sæmundur Ari	72
Hamada Myriam	330
Hamelin Bruno	571
Hamon Alexandre	91
Handy Mark R.	173
Hannouz Estelle	360, 362, 370, 843
Hanot Franck	533
Hanquiez Vincent	210, 646, 647, 648, 657
Hao Jihua	455
Harivel Carine	416, 426
Harley Simon	128, 556
Harper David A. T.	877
Harris Chris	256
Harscoat Valérie	513
Hasegawa Takashi	870
Hassan Kadar Mohamed	402
Hassani Riad	179
Hassler Auguste	517, 521
Hatté Christine	410
Hauchard Emmanuel	817
Haug Gerald	597
Haurine Frédéric	29, 644, 766
Hauville Benoît	384, 385
Havas Robin	275
Hazemann Jean-Louis	549
He Ruliang	625
Heap Michael J.	380
Heerwagen Eric	700
Hegna Thomas A.	740
Heida Hanneke	160, 680
Heilimo Esa	273
Helali Sabrine	166
Heller Beatrix	53
Hemelsdaël Romain	92, 93, 633, 634
Henrion Eric	110
Henry Adrien	206, 207, 563
Henry Bernard	287



Herbelin Maud	335
Heredia Carlos	431
Hermoso Michaël	324, 595, 618
Hernandez Bilbao Eider	651
Hernandez Maria-José	90, 177
Herny Clémence	461
Hertout Aurore	532, 538, 539
Hervouet Yves	803
Hesselbo Stephen P.	586, 624, 755, 757
Heuret Arnaud	154, 183
Hibsch Christian	225
Hildenbrand Anthony	830
Hippolyte Jean-Claude	670, 678, 832, 833
HiRISE team	462
Hlusko Leslea	714
Hoareau Guilhem	27, 86, 148, 651, 762
Hobléa Fabien	507, 801, 804
Hocquard Christian	302
Hoelzmann Philipp	601
Holder Robert	133
Homberg Catherine	21, 155
Homrani Sabrina	242
Honiat Charlotte	507
Hoorn Carina	638
Hopcroft Peter O.	627
Hoÿm de Marien Luc de	132
Huber Brian	604
Huck Thierry	713
Hudson Alexander J. L.	755
Huet Bastien	22, 506, 678, 787, 847
Huisman Ritske	135, 205
Hulbert Claudia	185, 512
Hulot Vivien	495
Huneau Frédéric	524, 811, 818
Hunter Stephen J.	627
Huntington Katharine	645
Huppert Kim	650
Huret Emilia	613, 624
Huruguen Pierre	156
Husson Eglantine	92, 643, 644
Husson Laurent	25, 36, 136, 226, 232, 497, 650
Huyghe Damien	21, 91, 860
Huyghe Pascale	30

Iacono-Marziano Giada	255, 274
Iemmollo Arthur	48
IGCP 667 Team	872
Ildefonse Benoît	76, 77
Iniesto Miguel	275
IODP 358 science team Expedition	196
IODP Expedition 381 Scientific Party Team	634
Ionov Dmitri	256, 262
Issautier Benoît	87, 101, 142, 539
Itié Jean-Paul	261
Iwańczuk Jolanta	583

Izart Alain	93
-------------------	----

J

Jackson Daniel J.	551
Jacob Jean-Baptiste	844, 848
Jacob Jérémy	565
Jacob Thomas	384, 385, 817
Jacob-Rousseau Nicolas	433
Jacquemet Nicolas	399
Jacquemoud Alexia	286
Jacquot Raphaël	784
Jaillet Stéphane	507
Jalil Nour-Eddine	735, 747
Jamaludin Siti Nur Fathiyah	872
Jame Patrick	54, 57
Janneau Kevin	575, 785
Janots Emilie	131, 554, 784, 844, 850
Janvier Thomas	536
Jarrige Jean-Jacques	803
Javaux Emmanuelle	723
Jeandel Catherine	487
Jeanneau Laurent	288, 746
Jeannin Laurent	397
Jeanpert J.	398
Jenny Jean-Philippe	313
Jervadilo Hanna	457
Jézéquel Didier	275
Jhine Meyessa	349
Jiménez-Moreno Gonzalo	637, 682
Jing Zhicheng	263
Joannin Sébastien	642
Johnson Paul	185, 512
Jolivet Laurent	26, 155, 193, 426, 675, 841
Jolivet Romain	106, 109, 185, 186, 315, 367, 512
Joly Yves	549
Jomard Hervé	313, 368, 370
Jomelli Vincent	289, 294, 591
Jones Matthew M.	604, 626
Jonfal Julie	263
Jørgensen SL	245
Jorry Stéphane	476, 688
Joseph Diana	518
Jost Anne	50, 814
Jouanne François	30
Jouannic Gwenaël	346, 393
Jouet Gwenaël	476, 688
Jouini Arbia	616
Jourdon Anthony	42, 137
Jouve Guillaume	321
Jouve Stéphane	786
Julienne Didier	303
Jullien-Sicre Agathe	853
Justice Sophie C.	802



K

Kabiri Lahcen.....	580
Kaci Tassadit.....	363
Kaczorowski Christian	678
Kai Cao.....	45
Kalifi Amir.....	22, 28, 94, 787, 847
Karabeyoglu Ali Uygar	617
Karpytchev M.....	347
Karyotakis Y.....	412
Kazachkina Ekaterina	197
Keddadouche Karim	294, 838
Keller Gerta	761
Kelson Julia.....	645
Kempton Pamela.....	253
Kernif Tarik.....	156
Kervella Youen	242
Kerverdo Raphaël.....	157
Khadri Syed F. R.....	761
Khaska Somar.....	813
Khiari Abdelkader.....	102
Khozyem Hassan	629
Khurshid Benazir	551
Kieffer Isabelle	549
King Andrew	261
Kioka Arata.....	655
Kirfatlane Zineb.....	222
Kjenes Fredrik	457
Klein Emilie.....	176
Klingelhoefer Frauke	152, 154, 183, 187, 191
Klinger Yann	315
Klinka Thomas.....	852
Kluska Jean-Michel.....	651
Knecht Bérénice	795
Koçi Rexhep.....	113, 560
Köhler Stephan.....	826
Kopf Achim.....	655
Kopp Heidrun	187
Korat Lidija	695
Korsakov Andrey	256
Kostoglodov Vladimir	197
Kostopoulos Dimitri.....	706
Košuličová Monika	133
Kovács Emma Blanka	587
Kowalewski I.....	218
Krausz Sophie	428
Krencker François-Nicolas.....	576, 580, 614
Krien Y.	347
Kröpelin Stefan	601
Krystyn Leopold	754
Kusznir Nick.....	153
Kylander-Clark Andrew R. C.	46, 117, 133

L

L'Hutereau Camille	804
--------------------------	-----

Labarthe Baptiste.....	814
Labasque Thierry.....	819
Labbé Vincent	546
Labeur Aurélie	86
Labrosse Stéphane.....	277
Lacan Pierre	871
Lacazedieu Annie	795
Lach Philippe	120, 131, 840, 848, 850
Lachérade Lucas	856
Lacombe Olivier	86
Lacombe Simon.....	15
Lacombe Tristan.....	66
Lacquement Frédéric	529, 533, 538, 539, 541, 543, 544, 836
Lacroix Pascal.....	315
Ladant Jean-Baptiste	235, 237, 238, 620, 638
Ladevèze Sandrine	708
Ladouche Bernard.....	215, 216, 217
Laenger Arthur	418
Laforge Aurelien.....	693
Lafuerza Sara	250
Laggoun Fatima	815, 822
Lague Dimitri.....	501
Lahfid Abdeltif.....	87, 194, 833
Lahondère Didier	532
Laigle Mireille.....	152, 182, 183, 187, 191, 212
Laine Charlotte	384, 385
Lallemant Serge.....	152, 175, 179, 182, 189, 191, 212
Lalonde Stefan	527
Lamarque Gaëlle.....	287
Lambert Clément	476
Lambert Philippe.....	466, 467, 470, 805
Lamotte Claudine.....	215, 216, 217
Lanari Pierre.....	77, 849
Landemaine Valentin	815
Landrein Philippe	607, 613, 624, 641
Landru Sébastien	656
Langlois Vincent J.	354, 469
Lanos Philippe	417
Lansigu Christophe.....	801
Lanson Bruno	31
Laouici Imad	93
Laperche Valérie	338, 822
Lara Yannick J.....	723
Laratte Sébastien	855
Lardeaux Jean-Marc.....	13, 17, 38, 39, 133, 140
Large Etienne	30
Larochelle Stacy	109
Larroque Christophe	364, 365, 369, 370, 837
Larrouquis Antton.....	288
Larson Kyle P.	41, 200
Larvet Tiphaine	138
Laskar Jacques.....	753, 756
Lasserre Cécile	108, 111, 113, 367, 511, 515, 560
Lasseur Eric	12, 18, 32, 88, 89, 96, 99, 101, 155, 358, 506, 535, 629, 643, 684, 685, 686, 691, 858, 859, 863
Lassin Arnault.....	769
Lasue Jérémie	459
Laudon Hjalmar.....	826



Lauer Tobias.....	445
Laugé Marie.....	237, 620
Launeau Patrick.....	559
Laurencin Muriel.....	187, 191
Laurent Amélie.....	428
Laurent Antonin.....	128, 190, 556
Laurent C.....	511
Laurent Gautier.....	841
Laurent Oscar.....	8, 118, 273
Laurin Michel.....	712, 728, 736
Lavastre Véronique.....	335
Lavenant Nicolas.....	819
Laville Thomas.....	727, 740, 748
Law Richard D.....	230, 239
Le Bayon Benjamin.....	87, 120, 132, 532, 533, 539, 849
Le Béchenec Yves.....	518
Le Borgne Tanguy.....	819
Le Bot Sophie.....	242, 479, 480, 485
Le Callonnec Laurence.....	21, 752, 857
Le Cornec Florence.....	605
Le Coz Jérôme.....	328, 329, 339
Le Forestier Lydie.....	336, 340
Le Gal La Salle Corinne.....	813
Le Gall Bernard.....	363
Le Godec Yann.....	261
Le Goff Maxime.....	413
Le Goff Samuel.....	523
Le Guevel Goulwen.....	618
Le Guillou Corentin.....	552, 553
Le Hir Guillaume.....	238, 240, 279, 638
Le Hir Pierre.....	482
Le Lay M.....	394
Le Maire Pauline.....	385, 470
Le Milbeau Claude.....	565
Le Moine Bauer S.....	245
Le Pennec Jean-Luc.....	62
Le Pourhiet Laetitia.....	137, 138
Le Quilleuc Meryll.....	525
Le Romancer Marc.....	296
Le Roux-Mallouf Romain.....	773
Le Roy Pascal.....	476
Le Strat Paul.....	678
Le Texier Marion.....	444
Le Trong Emmanuel.....	194
Lebourg Thomas.....	670
Lèbre Soline.....	562, 566
Lebrun Jean-Frédéric.....	152, 154, 179, 182, 183, 187, 191, 212
Leclerc Frédérique.....	531
Lecomte Jean-Claude.....	797
Lécuyer Christophe.....	57, 518, 581, 621, 725
Ledieu Lauriane.....	815, 822
Ledru Patrick.....	386
Lefebvre Bertrand.....	721, 726, 873
Lefebvre Gaétan.....	307
Lefebvre Guillaume.....	21
Lefeuvre Benjamin.....	188
Lefèvre Jean-Claude.....	417, 522
Lefort Apolline.....	788

Legal Stéphane.....	709
Legeay Alexane.....	122
Legeay Etienne.....	158
Legendre Lucie.....	182
Legentil Claude.....	289, 294
Léger Emmanuel.....	377
Léger Julien.....	97
Legout Arnaud.....	826
Lehmann Jérémie.....	284
Lejay Alain.....	651
Leleu Sophie.....	101, 142
Leloup Gaëlle.....	596
Leloup Maud.....	563
Leloup Philippe-Hervé ...	22, 28, 34, 44, 45, 54, 57, 108, 367, 534, 787, 839, 847
Lemasson Quentin.....	406, 436
Lemière Bruno.....	338
Lemierre Alfred.....	728
Lemoine Anne.....	246, 362, 371, 372, 843
Lemrabet Laëtitia.....	108, 511
Lengliné Olivier.....	109
Lenoir Louise.....	377, 387
Léonard Jean-Marie.....	537
Leprêtre Angélique.....	170
Leredde Christine.....	214
Leroux Estelle.....	268, 482, 672, 674, 678, 688
Leroux Hugues.....	552, 553
Leroy Etienne.....	33, 457, 774
Leroy Sylvie.....	165, 246, 250, 371, 372
Lescoutre Rodolphe.....	23
Lesniewska Eric.....	551
Lesourd Sandric.....	478, 481
Lesvignes Emilie.....	406
Letaïef Sarah.....	337
Letulle Thomas.....	581, 621
Lévigne Maëla.....	311
Levy Clara.....	320, 348
Leynet Aurélien.....	543
Leyrit Hervé.....	291
Lézin Carine.....	579, 671
Lhosmot Alexandre.....	816
Lhote Olivier.....	404
Li Gang.....	870
Li Menghan.....	625
Liber Yohan.....	330
Licht Alexis.....	237, 238, 638, 645
Linge Henriette.....	286
Lissak Candide.....	356
Little Crispin T. S.....	582
Livermore Philip.....	415
Lloret Emily.....	327
Locatelli Michele.....	117
Lodyga Ophélie.....	597
Lofi Johanna.....	160, 219, 470, 680
Loget Nicolas.....	12, 18, 96, 506, 678, 841
Loiselet Christelle.....	515
Lompo Djamila.....	21
Loncke Lies.....	154



Longuevergne Laurent	819
Lopez Christian	813
Lopez Michel	213
Lopez Simon	28, 359, 536
López-García Purificación	275
Lorenzo Saturnino	698
Lorenzo Valentin	617
Lorgeoux Catherine	568, 572
Loron Corentin C.	723
Louchart Antoine	520, 743
Louis Pauline	540
Lu Chia-Yu	457
Lu Wanyi	625
Lu Zunli	625
Lucas Louis	773
Lucazeau Francis	183, 187
Luccisano Vincent	729
Luo Yan	280

M

Magí L.	245
MAGIC Team	161
Magnin Valérie	131
Magnon Geneviève	816
Mahéo Gweltaz	44, 54, 57, 116
Mahieux Geoffroy	654
Mahroug Ali	147
Maillard Agnès	146, 160, 671, 680
Maillet Grégoire	211, 490, 495
Makou Matthew	571
Malartre Fabrice	391, 633
Malatesta Luca	650
Maldonado Antonio	632
Malet Jean-Philippe	315, 836
Malod-Dognin Chloé	420
Malvoisin Benjamin	397
Mammet Théo	314
Mamtani Manish A.	82
Manatschal Gianreto	23, 26, 145, 148, 151, 244
Manchuel Kevin	58, 366, 370
Mandalakis M.	245
Mandon Lucia	463, 514
Mangenot Xavier	89, 641, 834, 835
Mangold Nicolas	459, 460
Manjón-Cabeza Córdoba Antonio	258
Mansilla-Sanchez Alicia	806
Mansons J.	394
Mansouri Mohamed El Habib	665
Manzotti Paola	24, 126
Maquaire Olivier	356
Marache Antoine	856
Marandat Bernard	716
Marc Munsch	470
Marc Stéphane	358
Marcaillou Boris	152, 154, 179, 182, 183, 187, 191, 212
Marchand Grégor	445

Marchandon Mathilde	180
Marchant Ross	247, 602
Marconato Léo	367
Marcoux Eric	304
Mardhel Vincent	322
Maréchal Chloé	395
Margirier Audrey	45
Marie Nicolas	852, 858, 859
Mariet Anne-Lise	442
Marignac Christian	409
Marill Lou	192, 195
Marin Frédéric	419, 551
Marinova Maya	552
Marion Claire	478
Marivaux Laurent	716
Marlot Loïc	860
Marok Abbas	874
Marotta Anna Maria	140
Marquer Didier	849
Marquez Marcelo	228
Marriner Charlotte	461
Marrocchi Yves	274
Marroni Michele	38, 39
Marsan David	180, 192
Marteau J.	412
Martel Arnaud	418
Martel Caroline	64, 67, 74
Martelat JE	245
Martelet Guillaume	59
Marthaler Michel	840
Martignier Agathe	642
Martin Céline	48, 56
Martin Erwan	62
Martin Jeremy E.	517, 521, 575, 714, 725, 750
Martin Philippe	813
Martin-Closas Carles	750
Martinez Mathieu	604, 622, 635
Martinez Théo	863
Martin-Garin Bertrand	225
Martini Rossana	700
Martinod Joseph	25, 487
Martins J.	342
Martins Lisa	320, 348
März Christian	582
Mas Guillem	160
Mas Perrine	206, 207
Masini Emmanuel	14, 26, 153, 839
Maslo Martin	754
Masquelet Charles	246
Massa Charly	449
Masson Frédéric	110, 368
Masson Matthieu	329, 339, 562, 566, 567
Massonne Hans-Joachim	127
Masters Judith C.	713
Matenco Liviu	504
Mateo Paula	761
Mathé Vivien	439
Mathevet T.	394



Mathey Marguerite.....	105, 362, 373, 843
Mathian Maximilien	55
Mathieu Olivier	607
Mathot Emmanuel	369
Matoshko Andrei	103
Matoshko Anton	103
Matte Guillaume	321
Mattei Alexandra	524, 811, 818
Mattielli N.	446
Mattioli Emanuela.....	583, 585, 588, 614, 701, 874
Maubant Louise	197
Maudire Gilbert.....	513
Maureille Bruno	519
Maurice Sylvestre.....	458, 459
Maury Julie.....	359
Maxwell Erin E.	577
May Dave A.	135, 137
Mazur Jean-Charles	601
Mazza Paul	713
Mazzoli Stefano.....	51, 228
Mazzotti Stéphane	368, 843
McArthur Adam	654
Méar Yann.....	363, 474, 478, 481, 483, 488, 494
Médard Etienne	66
Medin Tsegai.....	715
Medjoubi Kadda	723
Meghraoui Mustapha	110, 875
Mehl Caroline.....	91
Meijer Paul.....	680
Meire Baptiste.....	817
Mekkaoui Abderrahmane	123, 809, 810
Melinte-Dobrinescu Mihaela Carmen.....	676, 677, 678
Melis Raphaël.....	54, 57
Melki Fetheddine	166
Melleton Jérémie	338, 844, 849
Menant Armel.....	193
Mendonça Filho João Graciano	579
Ménez Bénédicte	178, 452, 453, 454
Mengin Mathieu	322
Menini Alessandro	701
Mennecart Bastien.....	708, 734
Ménot Guillemette	571
Ménot René-Pierre	287
Menzer Lionel	27, 98, 157
Mercadier Julien	97, 386
Mercerat Diego.....	361
Merceron Gildas	521, 706, 714
Mercier Antoine.....	28, 54, 534, 536
Mercier Caroline	513
Mercier de Lépinay Bernard	152, 179, 212
Mercuzot Mathilde	233, 624, 635, 764
Merel Sylvain.....	566
Meriji Saad	331
Merle Didier	857, 862
Mertens Jan	404
Mertz Samuel.....	340
Meslin Pierre-Yves	459
Messenger Erwan	313

Messaoudi Fakher-Eddine.....	770
Metgalchi Armand	623
Métois Marianne	108, 111, 113, 360, 367, 560
Metzger Edouard	211, 495
Meunier Mathias	697
Meyer Solène.....	212
Michard André	37
Michaud François	90, 100, 177
Michel Sylvain	106, 109
Michels Raymond.....	93, 389, 391, 568, 569, 572
Michon Gilbert	291
Michon Laurent.....	7, 229, 371
Mickaël Lhéritier	731
Miège Cécile.....	329, 562, 566, 567
Mienlam Essi Mike-Franck.....	159
Mignot Mégane	440
Milesi Gaétan	48, 56
Milot Jean	420
Minoletti Fabrice.....	595, 618
Minon Nathan	25
Miquelis Florian	366
Miro Jordi.....	23
Missenard Yves	29, 33, 853
Moal-Darrigade Paul	493, 657
Moernaut Jasper	655
Mohaverad Merhan	331
Mohn Geoffroy	158, 162
Moine Bertrand.....	290, 291
Moine Bertrand N.....	256
Mokeddem Zohra	494
Molaro-Maqua Rémi	180
Mollen Frederik.....	517
Molliex Stéphane	678
Mombo Mouketo Metzger	388, 391
Monceret Eric	726
Monge Olivier	322
Monié Patrick.....	31, 48, 56, 150, 390, 830
Monkenbusch Johannes	761
Monnet Claude	718, 719
Monnier Christophe	116
Montagnac Gilles	452, 454, 455, 458, 519, 581
Montagud Anais.....	288
Montbrun Gauthier de.....	48
Montero Pilar.....	37
Montheil Leny	690
Montmartin Clément	198
Monvoisin Gaël.....	387
Moore Gregory	655
Morales Chloé.....	607
Morard Guillaume.....	264
Moreau Jean-David	613
Moreau Kévin.....	861, 862
Moreira David	275
Moreira Manuel	274
Morel-Deville Françoise	807
Morell Kristin	198, 199
Moreno-Soler Maria	862
Moretti Isabelle.....	398, 400, 402, 426, 427



Moretti Jean-Charles.....	426
Morgano Maxime	553
Morgans Hugh.....	654
Morin Guillaume	53
Morino Costanza	355
Moris-Muttoni Benjamin	194, 198
Morison Adrien	277
Mottram Catherine	119
Motus Martin	150
Mouazé Dominique.....	484, 485
Mouche Emmanuel.....	208, 378
Mouchi Vincent	422
Mouhri Amer.....	814
Moulin Marc.....	267
Moulin Maryline.....	161, 170, 268
Mouralis Damase	432, 444, 502
Mourgues Régis	376
Mourier Brice	329, 330
Mousavi Zahra.....	360
Mousnier Grégoire	288
Moussa Abderamane	601
Mouthereau Frédéric	11, 26, 42, 137, 150
Moyen Jean-François	8, 118, 282, 284
Mudd Simon.....	504
Mugnier Jean-Louis.....	30, 317
Mulch Andreas	119, 227, 230, 231, 239
Mulder Thierry	210, 646, 647, 648, 657
Muller Héloïse.....	482
Muller Veleda Astarte Paiva	127, 139, 167
Mulot Jonathan	827
Mumba Ruth	120
Münch Philippe	13, 31, 48, 56, 152, 179, 182, 212, 390, 690, 830
Munier Thomas.....	608, 623, 624
Munnecke Axel	628
Munoz Josep Anton	94
Muñoz Lopez José Daniel	33
Muñoz Praxedes.....	632
Munschy Marc	414
Murat Anne	341, 474, 478, 481, 483, 486, 488, 494
Murguía-Flores Fabiola	627
Museur Thomas	154
Musset Olivier.....	527
Myagkiy Andrey	400

N

Nabou Mohamed	809
Nabyl Zineb	307
Nachbaur Aude	544
Nader Fadi.....	659
Naffrechoux Emmanuel	334
Nalpas Thierry	156
Nandan Shyam.....	107
Nardelli Maria Pia.....	211
Nardin Elise	150
Nasri Khouloud.....	341
Nassif Fady	388, 391

Nassri Kawtar	16
Natasia Nanda.....	659
Natawidjaja Danny H.....	497
Nauroy Hadrien.....	620
Ndiaye Thierno	525
Nebel Oliver	273
Négrel Philippe	822
Nehme Carole	444, 502
Nesme Félix.....	698
Nespoulet Romane	814
Neumaier Martin	213
Nevado Christophe	213
Nexer Maëlle.....	242
Ngounou Ngatcha Benjamin	571
Nguema Ponce.....	159
Nguidi Mohamed Amine	658
Nguyen Tu Thanh Thuy	661
Nicoara Igor	103
Nicol Patrick	337
Nicollet Christian.....	83, 124, 125, 181
Nielsen Arne T.....	759
Nielsen Charlotte	162
Niessen Frank.....	319
Nirrengarten Michael.....	162
Nitsche Christoph.....	421
Nlend Bertil	524, 818
Noble Mark	854
Noblet Axel	461, 462
Nohra Youssef A.....	746
Noiret Corentin	716
Nomade Sébastien	763
Nomikou P.	245
Noret Aurélie	835
Norini Marie-Paule.....	336
Nosenzo Francesco	126
Nouibat Ahmed.....	845
Novak Mario	449
Noyes Caroline.....	791
Nunes José C.	243
Nuñez Guerrero Alejandro.....	640
Nunez-Trezeguet Francisco.....	351
Nyborg Ebbe	703
Nys Cécile.....	513
Nzie Moundom Oussenatou	662

O

O'Dogherty Luis	622
Obad Soukaina	658
Oberlin Christine.....	417, 522
Obert Daniel.....	857
Obut Olga T.	877
Odin Giliane P.	661
Odonne Francis	671
Oguadinma Vivian	248
O'Keeffe Connor	582
Oliot Emilien	20, 76, 77, 782



Olive Jean-Arthur	186
Oliveira de Sá Alana	250
Oliveira Elson P.	271
Olivetti Valerio	58, 292
Olivier Chloé	747
Olivier Matthieu	482
Olivier Nicolas	225
Oncken Onno	193
Oral Elif	365
O'Reilly Suzanne	296
Orogen Project Team	26
OROGEN Team	23
Orsi W.	245
Ortiz Alexandre	32, 96, 99, 684, 685, 686, 691
Ortuño María	871
Osinski Gordon	470
Osman Mohamed Kamel	665
Osorio Ivan	819
Osselin Florian	401
Ostanciaux Emilie	315
Ostorero Léa	70
Otero Olga	710, 750
Ou Xiong	45
Quabid Muhammad	78
Quadirou Khadija	222
Ouahada Sana	33
Ould Slimane Louise	68

Ö

Özkan-Altiner Sevinç	617
----------------------------	-----

P

Pace Aurélie	649
Pacheco Claire	406
Padel Maxime	532, 539, 544
Padron Crelia	152, 212
Pagani Colin	111
Paillard Didier	596
Paillès Christine	601
Paimbou-Ouene P.	342
Painchault Aude	444
Paita Gregori	398
Pajon-Perrault Nathalie	807
Palazzin Giulia	198
Pallares Carlos	377
PAMELA-MOZ35 Team	170
Pancrazzi Léo	484, 485
Pandit Bimal	253
Pandolfi Luca	38, 39
Panfilova Irina	569
Paquet Fabien	146, 358
Paquette Jean-Louis	115, 124, 282, 849
Paquez Camille	542

ParisBiota Team	749
Paris Guillaume	616
Paris Raphaël	63, 344
Parize Olivier	389
Parizot Oriane	29
Parlanti Edith	562, 567
Pasquon Kelly	346, 393, 461, 462
Passot Sophie	395
Pastier Anne-Morwenn	226, 650
Patel Manish	461
Paterne Martine	410
Pathier E.	511
Patrier Patricia	375, 390, 649, 830
Paul Anne	845
Pearson Graham	280, 283
Pearson Norman	296
Pébay Philippe	359
Pêcher Arnaud	784
Pecheyran Christophe	86
Pedley Andrew	163
Pedoja Kevin	226, 487, 632, 650
Pedreira-Segade Ulysse	455
Peiffert Chantal	97
Pélissié Thierry	794
Pélessier Nicolas	384, 402
Pellen Romain	268, 672, 674, 675, 676, 713
Pellenard Pierre	233, 607, 624, 630, 635, 764, 863
Pelleter Ewan	244
Pellissier Nicolas	385
Peltier Aline	65
Peña Francisco de la	552
Penaud Aurélie	476
Penguen Julien	829
Pennequin Didier	817
Perarnau Robin	423
Perdieu Franck	782
Pereda-Suberbiola Xabier	750
Pereira Alison	763
Pereira Inès	124
Perello Marie-Claire	657
Perino Lucie	667
Periollat Axel	195
Perrette Yves	334
Perrichon Gwendal	698
Perrichot Vincent	746
Perrier Vincent	575, 698, 730, 731
Perrillat Jean-Philippe	261, 263
Perrin Jonathan	551
Perrone Thierry	288
Perrot Julie	154, 363
Perroux Maëva	730
Person Alain	694
Pesce S.	342
Peschaux Caroline	406
Pesnin Marie	422
Pessoa Neto Otaviano da Cruz	161
Petersen Sierra V.	645
Petersen Sven	251



Petit Carole	838, 846
Petit Christophe	436
Petit Jean-Pierre	782
Petraccini Lorenzo	86
Petrelli Maurizio	228
Peuziat Bastien	481, 486, 488
Peuzin Andréa	100, 177
Peybernes Camille	700
Peyrotty Giovan	700
Pfeifer Lily S.	234
Philippe Meven	355, 462
Philippe Sylvie	324, 525
Philippon Mélody	31, 179, 182, 212, 690
Pichat Alexandre	91, 163, 164, 669
Pichat Sylvain	597
Pichavant Michel	67, 401, 769
Pichon Laurent	406, 436
Pichot Thibaud	183
Picourlat Fanny	814
Pierre Jordan	184
Pierre Trap	849
Pige Nicolas	701
Pignol Cécile	829
Pik Raphaël	18, 97
Pillière Henry	557
Pillot Quentin	235, 238
Piña-Valdès Jesús	107, 112
Pinel Virginie	315
Pinna-Jamme Rosella	55, 58, 835
Pisapia Céline	452, 454
Pitard Paul	34
Pitra Pavel	24, 115, 132
Pittet Bernard	22, 588, 656, 726, 787, 847
Plaziat Jean-Claude	637
Plunder Alexis	188
Plunian Franck	267
Poblete Fernando	238
Pochat Stéphane	234, 295, 591
Pohl Alexandre	625
Poidras Thierry	337
Pointal E.	511
Pointal Elisabeth	315, 515
Poiraud Alexandre	591
Poitrenaud Thomas	305
Poizot Emmanuel	474, 478, 481, 483
Poli Emmanuelle	647
Pollier Clément	640
Polymenakou P.	245
Pommerol Antoine	462
Pondaven Ildut	360, 361
Ponlevé Déborah	525
Pons-Branchu Edwige	334, 507, 642
Ponsolle Justine	479
Pont Sylvain	426
Ponthus Léandre	291, 296
Popescu Speranta-Maria	50, 222, 615, 637, 667, 672, 674, 675, 676, 677, 678
Poprawski Yohan	15

Portal Angélie	385, 817
Portier Eric	206, 207, 208, 375, 563
Potdevin Jean-Luc	213
Poujol Marc	20, 119, 126, 156, 201, 271
Poulenard Jérôme	333, 342
Poulet François	514
Poulet-Crovisier Nathalie	742
Pouliquen Sylvain	366
Poulton Simon	582
Pourret Olivier	307, 827
Pradel Alan	729
Prasad Vandana	870
Précigout Jacques	64, 122
Prémaillon Mélody	487
Prieur Marine	96, 508
Prigent Cécile	172
Prinzhofer Alain	402
Proborukmi Maria Sekar	633
Prognon Caroline	539, 544
Proietti A.	79
Proust Jean-Noël	90
Proux Olivier	549
Proy Catherine	315, 511, 515
Pubellier Manuel	251, 872
Pucéat Emmanuelle	630
Pugh Thomas A. M.	627
Pulcini Gregorio	17
Punekar Jahnvi	761
Püntener Christian	745
Putfin Marie-Sophie	533
Puzenat V.	245
Pwavodi Joshua	196

Q

Quantin Cécile	55
Quantin-Nataf Cathy	463, 469, 514
Quesnel Florence	533, 538, 543, 856, 862, 863, 864
Quesnel Yoann	470
Quidelleur Xavier	51, 830
Quijada Melesio	570
Quiles Anita	411
Quillévéré Frédéric	152
Quiquerez Amélie	423, 440
Quiquet Aurélien	627

R

Raack Jan	462
Raad Fadl	160, 680
Rabassa Jorge	640
Rabaute Alain	21
Rabineau Marina	268, 482, 672, 674, 675, 676, 678, 713
Racek Martin	46, 133
Rachoud-Schneider Anne-Marie	592



Racine Tanguy	507
Radakovitch Olivier	339
Radiguet Mathilde	180, 192, 195, 197
Radimilahy Chantal	421
Radkiewicz Maksymilian	231
Radu Ionna Bogdana	256
Raevskaya Elena	873
Raffiki Patrick	55
Raimbourg Hugues	194, 198, 199, 401
Rainaud Jean-François	537
Raingard Anne	59, 529, 541, 544
Rajic Kristijan	198, 199
Rallakis Dimitrios	389
Ramdane Nabil	628
Ramírez de Arellano Cristobal	127
Ramstein Gilles	627, 710
Rapin William	459
Rapuc William	823
Rasmussen Christian M.O.	877
Rasmussen Sten	656
Ratzov Gueorgui	594
Raucoules Daniel	358, 359
Ravanel Ludovic	286, 317
Ravier Édouard	295
Razin Philippe	87, 101, 206, 207, 320
Rebay Gisella	17
Reboulet Stéphane	839
Recouvreur Audrey	648
Recq Clément	445
Reddy Steve	128, 556
Reed Denne	712
Regard Vincent	25, 487, 490, 498
Regorda Alessandro	140
Reimann Tony	503
Remaci-Benaouda Nacera	123
Renard Maurice	857
Reninger Pierre-Alexandre	541, 544
Reolid Matías	583, 584, 585, 587, 874
Replumaz Anne	20, 34, 45, 108, 229
Revillon Sidonie	91, 163, 164, 165, 213, 688
Rey-Coyrehourcq Sébastien	444
Reyes Pedro	177
Reynard Bruno	581
Reynaud Jean-Yves	248, 570
Reynaud Marine	211
Reynaud Stéphanie	128, 554, 556
Rezwan N.	347
Riamon Ségolène	743
Ribes Charlotte	94, 148
Ribodetti Alessandra	159, 837
Riboulleau Armelle	570
Ricard Jannick	518
Ricci Julia	31, 390, 830
Ricciardi Frédéric	678
Richard Antonin	379, 387
Richard Hervé	438, 449
Richard Loïc	339, 562, 567
Richardin Pascale	518

Richoz Sylvain	754
Rickard William	128, 556
Ricordel-Prognon Caroline	538, 541, 543
Ridgwell Andy	625
Riding James B.	624, 755
Riesner M.	370
Rieux Alissia	481, 486, 488
Riffel Silvana Bressan	53
Rigaud Sylvain	700
Rigaudier Thomas	387
Rigollet Christophe	402
Rindharisaona Elisa	7
Ringebach Jean-Claude	94, 158
Rinterknecht Vincent	289, 294, 445, 591
Riou Briec	316
Riquier Laurent	623, 626
Ritz Jean-François	365, 369, 370
Riveline Janine	857
Rividi N.	200
Rivière Agnès	814
Rizza M.	370
Rkha Chaham Khalid	318, 825
Roattino Thibault	600
Robert Boris	240
Robert Christian	872
Robert Xavier	232
Robin Cécile 32, 49, 50, 52, 99, 205, 505, 535, 615, 637, 686, 691, 858, 859	
Robin Ninon	728
Robion Philippe	853
Roche Didier	591
Roche Olivier	63, 71
Roche Vincent	165
Rochette Pierre	470
Roda Manuel	17, 84, 140
Rodier Jean	424
Rodríguez-Pascua Miguel Ángel	408
Rodriguez-Rodriguez Laura	591
Roest Walter R.	154
Roger Françoise	849
Roger Marion	36
Rogerie Gregory	274
Rogov Mikhail A.	581
Rohmer Jérémy	856
Roig Jean-Yves	53, 168, 629
Rolandonne Frédérique	183, 187
Rolf Tobias	258
Rolland Yann	287, 293, 834, 835, 838, 846
Rolland-Guillard Jeanne	743
Romagny Adrien	31
Romanowicz Barbara	155
Roperch Pierrick	236
Rosa Angelika Dorothea	264
Rosanne Maria	404
Rosas-Carbajal M.	412
Rosat Séverine	269
Rosenberg Claudio	12, 18, 772
Roskosz Mathieu	274



Rossetti Federico.....	292
Rossi Magali	131, 333, 342, 406, 850
Rotevatn Atle	457, 774
Roubi Angélique	476
Rouby Delphine.....	205, 505
Rouet-Leduc Bertrand.....	185, 512
Rouget Isabelle.....	806
Rouleau Morgan	125
Roule-Chenieux Barbara	142
Roumazielle Viviane.....	662, 663
Rousseau Marine	449
Rousselle Bruno	599
Rousset Baptiste	192
Roux Quentin	150
Rozel Antoine	277
Rubatto Daniela	844
Rubi Romain.....	233
Rubino Jean-Loup. 22, 94, 506, 665, 666, 667, 670, 672, 674, 675, 678, 681, 787, 847	
Ruebsam Wolfgang.....	585, 587, 589
Ruffaldi Pascale	447
Ruffet Gilles.....	119, 227, 688
Ruhl Micha	586, 587, 757
Rupin Fabian	404
Russo Damiano	82
Rutman Philippine.....	651

S

S2S Project Team	684, 686, 691
Sabatier Pierre	286, 313, 316, 319, 344, 823
Saddiqi Omar	37
Sadji Radouane	628
Sahakyan Lilit	642, 694
Şahin Mustafa	319
Saïdi Hanen	349
Sailhac Pascal	470
Saillard Marianne	100, 177
Saint-Aubin Philippe.....	306
Saint-Bezard Bertrand	206, 207
Saint-Blanquat Michel de	79, 156, 288, 291
Saintenoy Albane	377
Sakalauskaite Jorune	419
Sakellariou Dimitris	146
Salaviale Céline	730, 743
Saleh Farid.....	726
Salomon Ferréol.....	437
Salomon Hélène	406
Salvador-Blanes Sébastien	821
Sambridge Malcolm	265
Samperton Kyle.....	761
San José Malwina	45
Sandoval Jose	622
Sanità Edoardo	38, 39
Sansjofre Pierre.....	527, 649, 791
Santoni Anne-Lise	607, 613, 624, 863
Santoni Sébastien	524, 811, 818

Santos-Fischer Cristiane B.....	243
Sapin François	154, 162
Sarda Philippe	29, 377
Sarkar Chiranjeeb	280
Sarr Anta-Clarisse.....	235, 237, 238
Saspiturry Nicolas	87, 101, 143
Saulet Pierre.....	425, 540
Sauter Daniel.....	246
Sautter Benjamin.....	251
Sautter Violaine	426
Savarino Joël	62
Save Sabrina.....	332
Savoye Nicolas	495
Saxey David.....	128, 556
Scaillet Bruno	274
Scaillet Stéphane.....	122
Scao Vincent	763
Scasso Roberto.....	484
Schaaff Valentine.....	571, 597
Schaan Renata	471
Schaltegger Urs	765
Schamper Cyril	678
Schauer Andrew	645
Scheid John	436
Schenini Laure.....	152, 182, 187, 191, 837
Schiavi Federica	24
Schimmelpfennig Irene	289, 294, 591
Schlögl Ján.....	575
Schlunegger Fritz.....	508
Schmidt Sabine	495, 513
Schmitt Anaïs	489
Schmitz Mark	764
Schnabl Petr	870
Schneider Jean-Luc	316, 457
Schnurle Philippe	161, 170, 268
Schnyder Johann	607, 635, 862
Schoene Blair	761
Schoeneich Philippe.....	801, 804
Schott Jacques	487
Schouw A.	245
Schovsbo Niels H.	759
Schreurs Guido.....	421
Schulmann Karel	133
Schulz Bernhard	271
Schuster Mathieu.....	642
Schwartz Stéphane	834, 835, 838
Scotti Oona	364
Scrinzi Maxime.....	332
Sebag Daniel	571
Sebai Nedhir.....	40
Seguin Maxime	730, 731
Seinhausser Asma	806
Semmani Nazim	636
Séon Nicolas	526
Sepulchre Pierre.....	232, 238, 609, 620, 638
Séranne Michel	92, 215, 216, 217, 219
Serin--Tuikalepa Iale.....	865
Serneels Vincent	421, 424



Serrano J.	79
Serrano Olivier	87, 101, 629
Servais Thomas	722, 877
Seydoux-Guillaume Anne-Magali.....	128, 554, 556
Seyler Monique	694
Sforna Marie Catherine.....	723
Shen Tianyi	44
Shen Yanan	625
Shen Zhengkang.....	112
Shmeis Marwa	666, 681
Sicilia Deborah	678
Sigmarsson Olgeir	72
Sigoyer Julia de	319
Silenziario Carmine	672, 674
Silva Ricardo L.	587
Siméon Yves	840
Simien Frédéric	533
Simonneau Anaëlle.....	815, 822
Simons Mark	186
Sinclair Hugh	504
Sissman Olivier	398
Sissmann Olivier.....	453
Sisson Jinny	202
Sizaret Stanislas.....	769
Skonieczny Charlotte	525
Smith Christopher P. A.	605, 748, 749
Smith Thierry.....	866
Soares Jose.....	161
Socquet Anne.....	107, 112, 180, 192, 195
Solé Floréal.....	708
Soliva Roger	15, 48, 56, 782
Solomatova Natalia V.	472
Sømme Tor O.	508
Somogyi Andrea.....	723
Sonzogni Corrine.....	601
Soreghan Gerilyn S.	234
Sørensen Aske.....	759
Soret Mathieu	41, 172, 200
Sorrel Philippe	22, 506, 593, 667, 678, 750, 787, 847
Soueidan Laura	21
Soulimane Choukri	585
Souron Antoine	714, 715, 734
Sourzac Mahaut	562, 567
Spadini L.	342
Spalla Maria Iole	17, 140
Spangenberg Jorge.....	575, 592, 606, 611, 614, 617, 629
Spangenberg Jorge E.	752, 753, 761
Specht B.	511
Spina Vincenzo.....	22
Spišiák Ján	254
Spötl Christoph.....	507
Stampfli Gérard M.....	840
Steckler Michael	184, 347
Stefani Vanessa.....	816
Stehly Laurent	845
Steiger Johannes	591
Steinmann Marc	816
Stephan-Perrey Juliette.....	532, 539

Sternai Pietro	127, 139, 167, 181
Stevens Gary	8, 282
Steyer Jean-Sébastien	729, 736, 743
Stigall Alycia L.	877
Štípská Pavla	46, 133
Stockey Richard G.....	625
Stoica Marius	103
Støren Eivind	286
Storey Craig.....	273
Strasser Michael.....	655
Stroebele Zoe.....	294
Strzeczynski Pierre	376, 559
Stünitz Holger	122
Suan Guillaume.....	575, 581, 588, 610, 621, 701
Suc Jean-Pierre.....	50, 222, 615, 637, 667, 670, 672, 674, 675, 676, 677, 678, 682
Suchéras-Marx Baptiste	575, 702, 789
Sudre Joël.....	513
Sue C.	370
Sue Christian	139, 287, 293, 360, 362, 373, 843
Sulli Attilio.....	166, 675
Sun Jianbao	108
Sun Yong	627
Surlyk Finn.....	703
Svahn Isabelle	563
Swai Violeth	286
Sylvest Matthew	461
Sylvestre Florence	601
Szopa Sophie.....	62
Szucs Dominika	755

T

Tabaud Anne-Sophie.....	46
Tabeliouna Mohammed.....	68
Tabuce Rodolphe	716
Tackley Paul J.	277
Tan Ning.....	238, 627
Tao Renbiao	454
Tapponnier Paul.....	149
Tarantola Alexandre.....	387
Tardif Delphine	237, 238, 638
Targhi Soukaina.....	222
Tartèse Romain.....	555
Tauzin Benoît	263, 265
Tavera Rosaluz	275
Tavernier Lucas	317
Tchang-Tchong Laurie.....	572
Team PAMELA-MOZ35.....	170
Télouk Philippe	420
Ternois Sébastien.....	42, 97, 168
Terrier Monique.....	545
Tessier Bernadette.....	479, 480, 481, 484, 485, 486
Tetard Martin.....	602
Texier Christophe.....	750
Teyssier Christian	230, 239
Thackrey Scott	248



Thebault C.	394
Thebault Erwan.....	415
Théron Audrey.....	782
Thibault Nicolas.....	589, 614, 703, 759, 761
Thiéblemont Denis.....	545, 840, 848
Thiery Ghislain.....	710
Thiery Régis.....	73
Thiery Yannick.....	320, 322, 348, 356, 836
Thiesson Julien.....	431
Thieulot Cédric.....	34
Thil François.....	410
Thinon Isabelle.....	26, 246, 371, 372, 837
Thirard Guillaume.....	356
Thollard F.	511
Thollon Maude.....	345
Thollot Patrick.....	463, 514
Thomas Camille.....	573
Thomas Hadrien.....	208, 378
Thomas Nick.....	462
Thomas Nicolas.....	461
Thomassot Emilie.....	280, 283
Thomazo Christophe.....	275, 527, 626, 635
Thompson Joseph.....	170, 268
Thoraval Catherine.....	259, 260
Thouin Hugues.....	336
Tibari Bouchaïb.....	97
Tinel Claire.....	315
Tinn Oive.....	873
Tissoux Hélène.....	529, 538, 539, 543, 544, 854, 865
Tkalcic Hrvoje.....	265
Tobi Adnan.....	78
Todisco Dominique.....	430, 432, 444, 445, 502
Tomaselli Lorenzo.....	82
Tommasi Andréa.....	259
Tonye Tedy Landry.....	159
Torelli M.	218
Tornabene Livio L.....	462
Torres Souza Jaqueline.....	579
Toullec Renaud.....	425
Toumoulin Agathe.....	238, 638
Tourlière Bruno.....	301, 546
Tournepiche Jean-François.....	725
Toussaint Hélène.....	807
Toussaint Marie-Laure.....	816
Traby R.	218
Trap Pierre.....	120
Travé Anna.....	33, 213
Travers Laurine.....	284
Tremblin Maxime.....	605, 629
Trévisan Jenny.....	364
Triantafyllou Antoine.....	116, 130, 446
Tribovillard Nicolas.....	213, 570, 662, 663
Truche Laurent.....	568
Tuduri Johann.....	307, 769
Tugend Julie.....	162
Turcq Bruno.....	605
Turki Imen.....	242
Turuani Marion.....	128, 556

Twardzik Cédric.....	113, 195
----------------------	----------

U

Uehara Minoru.....	470
Ullmann Clemens V.	624, 755, 757
Ulrich Marc.....	401
Ungemach Pierre.....	378
Uno Kevin.....	711, 714
Urban Brigitte.....	633
Uzel Jessica.....	686, 691

V

Vacher Pierre.....	344
Vaiedelich Stéphane.....	410
Valdes Paul J.	627
Valentin Xavier.....	750
Valery A.	394
Valla Pierre.....	45, 56, 58, 497, 600, 838
Vallicrosa G.	245
Vals Marilou de.....	427
van de Kamp Thomas.....	736
Van Den Driessche Jean.....	132, 234
Van der Beek Pieter.....	232
Van der Bilt Willem.....	286
Van der Woerd Jérôme.....	836
Van Hinsbergen Douwe.....	690
Van Lichtervelde M.....	79
Van Rijnsingen Elenora.....	106
Vanardois Jonas.....	849
Vanderhaeghe Olivier.....	79
Vandier Flore.....	452
Vandromme Rosalie.....	322
Vane Christopher.....	582
Vanhooydonck Pierre.....	821
Vannier Jean.....	720
Vanoudheusden Emilie.....	59
Varano Mariacristina.....	444
Varas German.....	213
Vassallo Riccardo.....	317, 600
Vazquez Riveiros Natalia.....	594
Vella Alex.....	546
Vella Marc-Antoine.....	431
Velomora Sylvain.....	421
Veltz Isabelle.....	807
Vendeville Bruno.....	40, 654
Vennin Emmanuelle.....	225, 275, 649
Ventalon Sandra.....	213, 662, 663
Vérard Christian.....	700
Verati Chrystèle.....	17
Verdoux Patrick.....	813
Verfaillie Deborah.....	289, 294
Vergés Jaume.....	10
Vergniault Christophe.....	366



Verhage Aart	286
Vérité Jean	295
Verlaguet Anne	188, 548
Vernhes Jean-David.....	425
Véron Alain	332
Verrier Fanny	170
Vetel William.....	158, 165
Vettor Tommy.....	426
Vezinet Adrien	280, 282, 283
Viana Adriano.....	161
Vianey-Liaud Monique	716
Vidal Muriel.....	783
Vidal Murielle.....	476
Vidal Olivier	26, 308
Vidal Valérie	213, 220, 253
Viers Jérôme	487
Vieugué Julien	416
Vigny Christophe	176
Villa Igor M.	230, 239
Villegas Juan Carlos	360
Villeneuve Nicolas.....	542
Villier Loïc.....	605
Vincent Benoît.....	208
Vincent Peggy.....	526, 575, 735
Vincent Stephen J.	103
Vinçon-Laugier Arnaud.....	518, 520, 581, 621, 725
Vinsot Agnès	569
Violette Sophie.....	50
Viovy Nicolas.....	609, 638
Viseur Sophie	702
Vissac Carole	428
Visscher Pieter	563, 649
Vizcaïno Daniel.....	726
Vlasopoulos O.	245
Vlastelic Ivan	256
Vlieghe M.	446
Voinchet Pierre	502, 854, 865
Voisin Christophe.....	361
Voisin Juliette.....	288
Voisin Vincent	807
Volat Matthieu.....	463, 514
Vuichard Nicolas	609
Vullo Romain.....	725, 750

W

Waisfeld Beatriz	873
Waldner Maxime	12
Walker Charlotte E.	702
Wallinga Jakob	503
Walpersdorf Andrea.....	360, 362, 373, 843
Walter-Simonnet Anne-Véronique.....	442, 447, 494
Wang Guo-can	44
Wang Guo-Can	45
Wang Shuaitao	814
Wang Wenhui	873
Wang Yanbin	263

Warmé Nicolas.....	413
Warny Sophie	682
Warren Clare	127
Waszek Lauren	265
Watremez Louise	146, 165
Wawrzyniak Pierre.....	385
Webster T.....	239
Weill Pierre	484, 485
Weiss Jérôme	195
Werle Mariana	8
Werly Julien	404
Weschenfelder Jair	243
Westerweel Jan.....	236
Whittaker Alexander C.	508
Widhen Florian.....	217, 219
Wilk Stanislas	646, 647
Win Zaw	645
Winner A.	347
Witt Cesar.....	201, 231
Witt César	51, 228
Wolf S.	218
Woollett James	430, 445
Wu Bo	44
Wu Guiling	44

Y

Yacoub Abdallah Nassour	601
Yang Deming	715
Yans Johan	684, 716
Yari Anice	328
Ye Jing	144
Yem Mbida	159
Yene Atangana Joseph Quentin.....	159
Yokoyama Yusuke	649
Youcef Brahim El Hadj.....	102

Z

Zacai Axelle	575, 710
Zanetta Pierre-Marie.....	552
Zanoni Davide	17, 84
Zao Zhengfu	759
Zappa Damien	592
Zattin Massimiliano.....	51, 58, 228, 292
Závada Prokop	46
Zayane Rachid	43
Zerathe Swann	105, 317, 838
Zeyen Hermann.....	208, 377
Zhang Pan.....	44
Zhang Yuandong	877
Zhang Yuan-Ze	45
Zhang Yurui	713
Zhu Chengyu	44
Zordan Elodie	208



Zuber Marcus	736
Zucali Michele	202

Zuddas Pierpaolo	857
------------------------	-----