

Vague D : campagne d'évaluation 2012 - 2013

Unité de recherche : UMR 7193 iSTeP

2.1. Projet scientifique de l'unité

1. Présentation de l'unité

a. Historique et contexte

Comme indiqué dans le bilan, l'iSTeP, créé au 1^{er} janvier 2009, résulte de la fusion réussie entre plusieurs équipes. Cette réussite doit beaucoup au fort soutien de l'UPMC, traduit en termes de postes et de financement d'équipements. Nous entrons donc dans une phase de stabilisation et de développement avec sensiblement les mêmes contours scientifiques. Un rapprochement avec l'UMR Sisyphe, ainsi qu'avec le Laboratoire de Géologie de l'ENS, dont nous sommes thématiquement proches, avait été étudié par les tutelles au moment de la création de l'iSTeP. Cette évolution reste souhaitable et prendrait tout son sens dans la structuration des Géosciences au sein de l'OSU « Ecce Terra » auquel ces trois unités appartiennent.

b. Caractérisation de la recherche

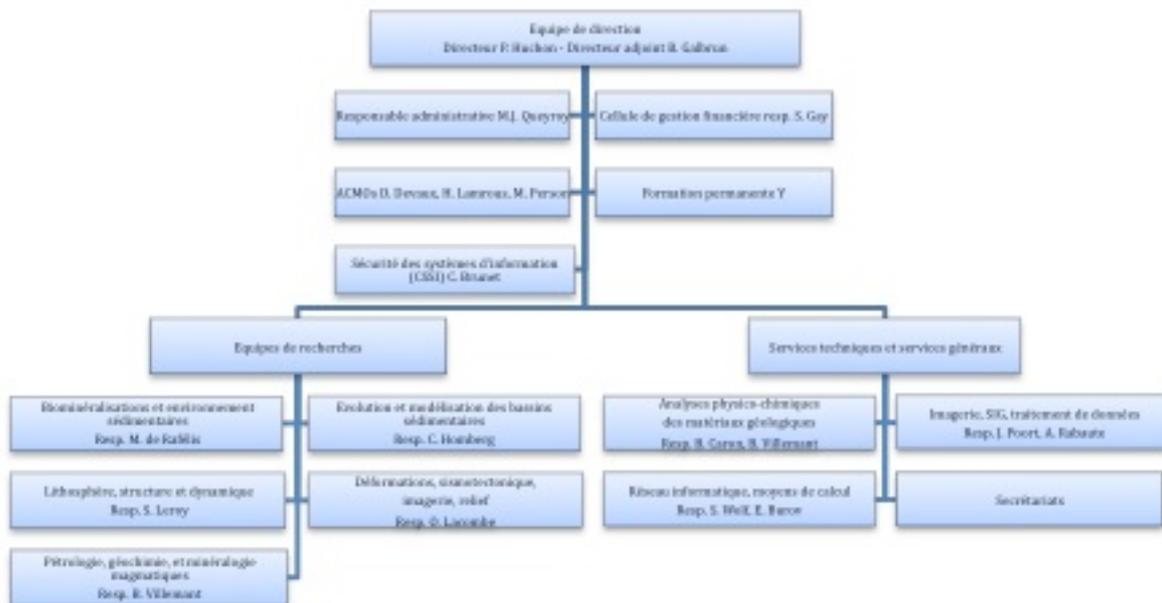
L'iSTeP est essentiellement une unité de recherche fondamentale, même si les contrats de collaboration de recherche avec des partenaires industriels sont nombreux, car il s'agit généralement de recherche très amont par rapport aux problématiques industrielles. Il n'en reste pas moins que l'unité concourt à apporter des réponses à des questions d'enjeux sociétaux (aléas naturels), économiques (ressources naturelles) et culturels (au sens de l'acquisition de connaissances nouvelles et/ou de nouveaux concepts). Notre activité de recherche s'adresse donc à la société au sens large, sans oublier les étudiants en Sciences de la Terre dont nous assurons la formation initiale, ainsi que la formation à la recherche par la recherche.

c. Organigramme fonctionnel et règlement intérieur

Par rapport au contrat actuel, l'organisation de l'unité sera modifiée à trois niveaux : la direction, les équipes de recherche et le support technique.

L'équipe de direction comportera, outre le directeur actuel, un nouveau directeur-adjoint. Le directeur actuel a par ailleurs exprimé le souhait de passer le relais à mi-mandat 2014-2018. Le choix du futur directeur devra intervenir au plus tard en 2015.

Les contours des équipes de recherche seront peu modifiés, à l'exception de la fusion des deux équipes « Magmas, minéraux, matériaux » et « Pétrologie, géochimie, volcanologie » en une seule équipe « Pétrologie, géochimie, minéralogie magmatiques ». 80% des responsables d'équipe changent, avec un rajeunissement et une meilleure parité (2 équipes sur 5 animées par des collègues femme - au lieu de 0/5).



L'organigramme complet est fourni en *annexe*.

Les plateformes techniques verront leur organisation améliorée et mieux mise en accord avec la structuration des plateformes de l'OSU « Ecce Terra ». Elles seront systématiquement animées par un binôme chercheur (ou enseignant-chercheur) - ingénieur.

Le tableau ci-dessous résume le **potentiel d'appui technique et administratif** de l'unité, potentiel qui devra être conforté (voir le paragraphe « politique de recrutement ») :

Gestion administrative et financière		Ateliers et plateformes analytiques	
BRUNEAUX Marc	Secrétariat	BADIA Dominique	Analyses pétrographiques
DERLY Sylvie	Secrétariat / gestion	BOUDOUA Omar	Responsable MEB
DOLLIN Gitane	Secrétariat / gestion	CARON Benoit	Responsable ICP-MS
GAY Sandrine	Responsable gestion	DELAIRIS Eric	Litholamellage
NANTET Véronique	Secrétariat / gestion	DEVAUX Didier	Litholamellage
QUEYROY Marie-José	Responsable administrative	LABOURDETTE Nathalie	Spectrométrie de masse
VINCENNES Celina	Services généraux	LAMROUS Hayat	Histologie
Cartographie, images, SIG		MUCCHIELLI Marylène	ICP AES, chimie
BROUILLET Jean-François	Cartographie numérique	RAGU Alain	Caractérisation matériaux
LETHIERS Alexandre (50%)	Infographie	SAVIGNAC Florence	Géochimie organique
MORGANT Isabelle (50%)	SIG	Calcul, réseau	
MORONI Marco	Imagerie numérique	BRUNET Christophe	Réseau
PASQUIER Danièle	SIG	MORGANT Isabelle (50%)	Web
POORT Jeffrey	SIG / traitement données	WOLF Sylvie	Calcul

Le règlement intérieur actuel reste en usage et l'unité continuera bien sûr à se conformer aux différentes chartes en vigueur (sécurité, propriété intellectuelle, doctorants, etc.). En termes d'hygiène et de sécurité, le problème majeur à résoudre est celui du dysfonctionnement des sorbonnes, dont l'utilisation est parfois impossible, ce qui pénalise les travaux de recherche.

2. Analyse SWOT et objectifs scientifiques de l'unité

a. Analyse SWOT

Les **points forts** qui ressortent du bilan de l'unité depuis 2009 couvrent l'ensemble des critères retenus pour l'auto-évaluation :

- une dynamique positive concrétisée par une production scientifique très significative quantitativement (3,3 publications par an et par équivalent temps plein recherche) et qualitativement (vecteurs de publication à fort impact, citations...),
- un rayonnement et une attractivité se manifestant non seulement par les projets scientifiques en collaboration et la participation à des réseaux, mais aussi par l'accueil de chercheurs de haut niveau, l'organisation de colloques, la participation (et parfois la présidence) d'instances scientifiques,
- des interactions fortes avec l'environnement socio-économique au travers de nombreux contrats de collaboration de recherche,
- une organisation interne de la vie de l'unité qui, sur la base de l'enquête effectuée, semble globalement satisfaire ses membres,
- une forte implication dans la formation initiale comme dans la formation par la recherche.

Quelques **points faibles** ont cependant été identifiés :

- un potentiel CNRS (chercheurs et ITA) en voie d'érosion : c'est sans doute un des défis majeurs du prochain contrat,
- le faible nombre de post-docs étrangers, qui montre que des efforts doivent être faits dans la recherche de financements adéquats ainsi que sur la publicité sur les postes ouverts,
- une faible présence dans les programmes européens, en partie liée au ciblage des appels d'offres,
- le sur-service d'enseignement des enseignant-chercheurs (20 à 30 heures annuelles en moyenne), qui reste un handicap déjà identifié lors de la préparation de l'actuel contrat. Malgré une légère amélioration, il convient de poursuivre les efforts, en particulier au travers d'une rénovation pédagogique (diminution du présentiel, travail en mode projet...).

En dehors de la question des ressources humaines, qui n'augmenteront probablement pas beaucoup compte tenu de la situation des finances de l'Etat, le **risque** majeur est probablement, si les ressources financières récurrentes continuent de diminuer fortement au profit des ressources contractuelles, une déstabilisation de l'unité par l'impossibilité de mener une politique scientifique (transformation en « hôtel à projets »). Jusqu'à présent, deux voies ont été explorées : la candidature à un statut d'Institut Carnot (avec d'autres laboratoires de l'UPMC), malheureusement sans succès, et la mise en place d'un « préciput labo » sur les contrats qui le permettent, préciput qu'il faudra probablement augmenter (il est actuellement de 8%). Il nous semble en effet essentiel de pouvoir continuer à soutenir d'une part des projets internes appelés à être ensuite financés par ailleurs (« seed money »), ainsi que les chercheurs productifs dont les propositions n'ont pas été retenues pour financement sur appel à projet, d'autre part de pouvoir assurer un fonctionnement de base des plateformes techniques. Enfin, la multiplication des « guichets » est également un handicap lourd à surmonter car source d'inefficience (augmentation des ressources consacrées à la recherche de financement au détriment de l'activité de recherche elle-même).

Les **opportunités** à saisir sont probablement à rechercher dans une diversification des partenariats : diversification vers d'autres partenaires que l'industrie pétrolière, diversification vers d'autres partenaires que nos partenaires traditionnels (BRGM, Ifremer, IFPEN, IRSN, etc.), en particuliers européens. Du point de vue académique, la mise en place de l'OSU « Ecce Terra » constitue également une opportunité de développement de collaborations et de mise en commun d'outils et de compétences (politique de plateformes mutualisées).

b. Projet scientifique

Le bilan et l'auto-évaluation de l'unité fait clairement ressortir une large palette de compétences et de thématiques scientifiques, allant de la formation des planètes aux événements paléo-climatiques extrêmes en passant par la dynamique de la lithosphère. Les compétences analytiques *sensu lato* couvrent également de nombreux domaines des Sciences de la Terre : géochimie, géophysique, minéralogie, tectonique, pétrologie magmatique et métamorphique, sédimentologie, stratigraphie, volcanologie. L'**originalité de notre projet** consiste en l'association étroite entre ces différentes approches et notre **ambition** est de continuer à construire une unité qui se positionne

scientifiquement aux **interfaces** non seulement entre disciplines des Sciences de la Terre, mais aussi avec la biologie, la chimie, les mathématiques, la physique. Un autre point fort de l'unité est d'avoir su maintenir une approche « **terrain** » très marquée (et appréciée de nos partenaires comme des recruteurs de nos étudiants), tout en développant des **approches analytiques et modélisatrices de pointe**.

Le projet scientifique global de l'unité se nourrit logiquement des projets exposés en détail dans les **prospectives des équipes**, qui concernent cinq grands domaines sur lesquels est calquée l'organisation entre équipes de recherche:

- l'étude et les reconstitutions des paléo-environnements et paléo-climats à partir de l'étude géochimique et minéralogique des tissus biologiques minéralisés (équipe « Biominéralisations »),
- l'évolution et la modélisation des bassins sédimentaires (équipe « Bassins »),
- le comportement de la lithosphère du court terme sismogénique au long terme géologique (équipe « Déformations »)
- les relations entre la déformation de la lithosphère et la dynamique du manteau (équipe « Lithosphère »),
- la pétrologie et géochimie des systèmes magmatiques (équipe « Magmas »).

De la richesse de ces prospectives, largement ancrées par ailleurs dans les réflexions prospectives menées aux niveaux national et international, émergent quelques grands **défis transdisciplinaires** auxquels nous nous proposons de répondre :

- intégrer globalement le rôle des fluides dans les processus tectoniques, sédimentaires et magmatiques, à toutes les échelles, en allant du traçage isotopique à l'intégration dans les modélisations numériques,
- construire des modèles thermomécaniques 3D intégrant (1) la thermodynamique (changements de phase) ainsi que le couplage avec la modélisation stratigraphique (érosion / remplissage des bassins et évolution de la matière organique) et (2) les différentes échelles de temps, du court terme sismique au long terme géologique. Ces modèles devront également prendre en compte la libération / circulation de fluides superficiels et profonds et intégrer les données spatiales (GPS, interférométrie),
- aborder de manière totalement transdisciplinaire la question des interactions entre dynamique interne (tectonique, volcanisme) et (paléo)climats, à laquelle peuvent contribuer toutes les équipes de l'iSTeP, et développer les interactions avec les unités de l'OSU impliquées dans le domaine des sciences du climat.

Le point essentiel est la volonté de renforcer les **interactions existantes entre les équipes**, car, sans être une unité fortement axée par exemple sur la pétrologie-géochimie ou la paléoclimatologie, nous avons la capacité à aborder des problèmes scientifiques de manière originale par rapport à d'autres unités plus spécialisées, en mobilisant des compétences complémentaires et en nous appuyant sur un potentiel analytique de haut niveau dont il faudra poursuivre le développement. L'ensemble de ce projet devra donc bien sûr s'appuyer sur des développements méthodologiques et analytiques (exposés dans les prospectives des équipes) et sur un rôle fort de la structuration en plateformes, qui devra être accompagnée financièrement, à la fois au niveau de l'OSU et de l'unité.

L'objectif en construisant l'iSTeP il y a quatre ans était de rassembler les forces dans le domaine des Sciences de la Terre à l'UPMC pour développer des synergies et mutualiser les ressources, **notre ambition est maintenant de nous positionner clairement comme une unité pluri-disciplinaire capable d'aborder des questions scientifiques majeures de manière originale** et de faire progresser les connaissances tout en ayant le souci des retombées socio-économiques (ressources et risques naturels).

3. Mise en œuvre du projet

La **politique scientifique** de l'unité consiste en premier lieu à identifier les éléments de prospective (souvent nationale, voire internationale) pour lesquels nous pouvons apporter une contribution scientifique originale, en termes de connaissance, de concepts, de méthodologies, de part les compétences et moyens analytiques disponibles au sein de l'unité. Nous avons également le souci d'envisager, en amont, les implications de nos recherches dans trois grands domaines où les Sciences de la Terre jouent un rôle central : les Ressources (principalement énergétiques, mais aussi minérales), l'Environnement (essentiellement à travers une approche paléo-environnementale) et les Risques naturels (sismiques, volcaniques, gravitaires). Nos préoccupations se situent donc au cœur de la recherche à la fois fondamentale et finalisée, mais concernent aussi la formation par la recherche aux métiers des Sciences de la Terre, comme le montre la bonne insertion professionnelle des docteurs formés au sein de l'iSTeP.

La **stratégie de mise en œuvre du projet scientifique** s'appuie sur l'analyse SWOT exposée précédemment, afin de mettre en œuvre les actions concrètes permettant de consolider les points forts et saisir les opportunités tout en améliorant les points faibles et en limitant les risques liés à l'évolution budgétaire prévisible (ressources humaines comprises).

Le projet scientifique sera mis en œuvre avec trois niveaux de coordination dans l'unité : les équipes de recherche, les groupes de projets transverses et les groupes de projets contractuels (ANR, industrie, etc.), qui sont souvent également inter-équipes.

Les **équipes de recherche** continueront d'avoir une assez large autonomie, traduite au plan budgétaire par l'attribution, comme lors du contrat actuel, d'environ 2/3 des ressources récurrentes auxquelles s'ajoutent le « préciput labo » de 8% sur les contrats industriels et les prestations. Le 1/3 restant est actuellement réparti entre le fonctionnement général et les actions scientifiques sur projets (« projets internes »).

Parmi les **évolutions envisagées**, deux actions seront entreprises en fonction des ressources disponibles (c'est à dire de l'augmentation en volume et/ou en pourcentage du préciput labo sur les contrats) :

- le financement d'un fonctionnement de base des plateformes analytiques, actuellement financées soit sur projet, soit sur le budget de l'équipe
- le financement de projets transverses, qui viendrait remplacer ou s'ajouter, si les ressources le permettent, aux « projets internes »

La politique de **partenariat** visera à élargir le spectre de nos partenaires, afin de ne pas être trop dépendant d'un seul, même si ce partenariat « majoritaire » remplit ses objectifs. Sans doute faudra-t-il également mener une étude prospective de possibles partenariats avec des PME (100% de nos contrats étant actuellement avec de grands groupes industriels).

La **recherche de ressources financières** via les contrats industriels sera menée en parallèle avec celle de ressources au niveau européen, qui est le point faible actuel. Par contre, nous maintiendrons les ressources de type prestation à un niveau faible, comme actuellement, ne disposant pas des moyens humains pour y faire face. Nous envisageons par ailleurs :

- de participer à un nouveau projet d'Institut Carnot
- d'augmenter le montant du « préciput labo », afin de maintenir un équilibre entre les ressources strictement affectées aux projets et les ressources permettant de mener une politique scientifique (cf. plus haut)

La **politique de recrutement** sera basée, comme pour l'actuel contrat, sur l'analyse des besoins en compétences pour la réalisation du projet scientifique, que ce soit pour les chercheurs et enseignant-chercheurs ou pour les ITA/IATOS. Nous avons également identifié les départs prévus ou probables au cours du prochain contrat, afin de pallier une éventuelle perte de compétences. Il s'agit d'E. Barrier (CR1, reconstructions paléo-tectoniques), F. Bergerat (DR1, tectonique cassante), A. Jambon (PRCE1, planétologie), D. Pasquier (IGR2, SIG), A. Person (MCF, sédimentologie), M. Sébrier (DR2, sismotectonique), B. Villemant (PR1, géochimie volcanique) et B. Vrielynck (CR1, reconstructions paléogéographiques). Les conséquences principales en seront (1) un besoin de « leadership » en pétro-géochimie et (2) une diminution de nos forces sur le volet « reconstructions paléogéographiques et paléotectoniques », point fort des consortia Téthys, puis MEBE et DARIUS.

Plusieurs profils scientifiques ont été envisagés pour le prochain contrat dans divers domaines mais il apparaît clairement que le nombre de postes « frais » sera restreint dans les années futures et qu'il convient donc de définir une stratégie : pour les postes CNRS, continuer à rechercher activement d'excellents candidats au recrutement, mais aussi en mutation ; pour les postes d'enseignant-chercheurs, mettre l'accent sur quelques profils stratégiques pour l'unité mais aussi pour l'UPMC, qui cherche à développer les postes aux interfaces scientifiques et les recrutements inter-UFR. Les principaux objectifs seront donc :

- de renforcer les interactions entre les équipes par le recrutement d'un maître de conférences sur un profil concernant les interactions entre les fluides et la mécanique de la croûte,
- de pérenniser le poste de professeur associé en télédétection, qui représente une ouverture vers le spatial, en forte interaction avec les mathématiciens et les physiciens. Les applications scientifiques des développements attendus sont multiples : caractérisation des phénomènes transitions associés aux séismes ou aux éruptions volcaniques, rhéologie court terme de la croûte, mouvements de terrain, imagerie sous-marine exploitant la totalité du signal des sondeurs multi-faisceaux,
- d'assurer un leadership dans le domaine de la pétrologie-géochimie en recrutant un professeur de haut niveau à même d'animer et d'accompagner l'évolution de l'équipe de pétrologie-géochimie, en interaction

avec le Labex MATISSE et le DIM OxyMore, que ce soit par un recrutement/mobilité externe ou par promotion locale,

- d'accompagner et d'anticiper les départs prévisibles en ouvrant un poste de professeur destiné à un maître de conférences HDR en position de prise de responsabilités à l'échelle de l'unité.

Outre le maintien des fonctions d'intérêt prioritaire (gestion financière, responsable administrative, plateformes techniques spécialisées) en cas de départ ou mutation, nous souhaitons **renforcer notre soutien administratif et technique** en logistique et gestion financière, en préparation et analyse d'échantillons et en traitement de données géophysiques.

Nous maintiendrons par ailleurs l'effort de **mutualisation**, que ce soit en termes de personnels, d'équipements ou de locaux, afin d'optimiser l'usage des ressources mises à disposition de l'unité.

La **politique de formation permanente** sera maintenue et si possible renforcée, la limitation n'étant d'ailleurs pas d'ordre budgétaire mais en termes d'offres de formation. De même, une attention particulière continuera d'être portée à la **promotion des personnels ITA/IATOS**, en particulier en encourageant et en accompagnant la candidature aux concours.

L'**hygiène et la sécurité** resteront des aspects prioritaires, malgré les difficultés d'ordre administratif et financière à obtenir le maintien en bon fonctionnement d'équipements tels que les sorbonnes.

Enfin, la **politique de diffusion des résultats** (publication dans des revues à fort impact, participation à et organisation de colloques, etc.) sera poursuivie, mais un effort devra être fait sur la communication externe, en particulier via le site web de l'unité, qui reste trop peu alimenté par les chercheurs en résultats scientifiques.

L'unité devrait donc évoluer, au cours du contrat 2014-2018, vers plus d'intégration entre équipes et aux interfaces avec les autres disciplines (en particulier la physique, la biologie, mais aussi les mathématiques et la chimie). Nous avons conscience que cette **évolution** sera fortement contrainte par les difficultés budgétaires actuelles, mais qu'en accentuant le ciblage (postes), la mutualisation (postes et équipements) et la recherche de nouveaux partenariats, nous pourrions atteindre nos objectifs scientifiques.

Prospective de l'équipe « Biominéralisations et Environnements Sédimentaires »

Responsable : Marc de Rafélis

Personnels Enseignants-chercheurs : Catherine Beltran (MCF), Jorge Cubo-Garcia (PR2), Laurent Emmanuel (MCF-HC), Laurence Le Callonnec (MCF), Fabrice Minoletti (MCF), Alain Person (MCF-HC), Alexandra Quilhac (MCF), Marc de Rafélis (MCF, HDR), Loïc Ségalen (MCF), Pierpaolo Zudas (PR2)

Personnels BIATOS : Nathalie Labourdette (IE), Hayat Lamrous (ADJ), Marylène Mucchielli-Person (TECH), Véronique Nantet (ADJANES)

Personnels non-permanents : Philippe Blanc (coll. bénévole), Armand de Ricqlès (PR-collège de France, émérite), Maurice Renard (PR, émérite), Louise Zylberberg (DR, émérite), étudiants (M1, M2, doctorants), post-doctorant et chercheurs invités.

1. Contexte général

L'équipe Biominéralisations et Environnements Sédimentaires a participé à la création de l'ISTeP en 2009 passant d'une structure de Jeune Equipe (JE2477, contrat 2005-2009) à celle d'une équipe intégrée à une UMR. Cette transition s'est révélée bénéfique à la fois en terme de production scientifique et en terme de lisibilité nationale et internationale. La thématique scientifique développée dans ce groupe concerne les reconstitutions des paléoenvironnements et des paléoclimats à différentes fréquences temporelles à partir d'informations (géochimiques et minéralogiques) déduites de tissus minéralisés par un organisme biologique et de l'environnement sédimentaire. La particularité de nos approches réside dans l'association d'expérimentations sur des organismes actuels en milieu contrôlé (naturel ou laboratoire) et les applications fossiles à des périodes choisies de l'histoire de la planète. Les modalités de conservation des données environnementales primaires portées par les biominéralisations retiennent également notre attention afin de pouvoir discriminer la part liée au milieu, au métabolisme et à la diagenèse dans l'enregistrement géochimique. Les interactions fortes avec des collègues de la biologie et de la chimie nous a permis de porter un PPF « Biominéralisations » qui a débouché fin 2011 sur la création de l'axe Biominéralisations du Labex MATISSE.

Fortement tournés vers l'analyse et le développement méthodologique, les membres du LBES sont des éléments moteurs de la structuration locale (UMR, UFR, UPMC) des ateliers et équipements dédiés aux analyses en géosciences. Une reconnaissance forte des savoir-faire et des potentialités analytiques au sein de l'ISTeP sera, pour l'ensemble du LBES, un enjeu majeur du prochain contrat. Au-delà d'un effort d'affichage, un soutien des différentes tutelles aux métiers et à l'analyse est souhaité pour que nous puissions disposer à l'UPMC d'un matériel à la pointe de l'innovation permettant de rester concurrentiel vis à vis des laboratoires et établissements nationaux et internationaux.

Le LBES, uniquement composé d'Enseignants-chercheurs, porte un intérêt particulier à l'investissement collectif et pédagogique. Du cycle d'intégration aux spécialités de Master, les membres du LBES sont des acteurs importants de la formation en salle, sur le terrain et par la recherche. L'adossement progressif de l'enseignement à la recherche au cours des différentes années universitaires est une volonté qui se traduit par la création et la responsabilité d'unités d'enseignements plus ou moins spécialisées et un taux d'encadrement élevé.

2. Le projet de recherche

Ces dernières années, le LBES s'est spécialisé dans l'étude et les reconstitutions des paléoenvironnements et paléoclimats à partir de l'étude géochimique et minéralogique des tissus biologiques minéralisés. En domaine marin hauturier, notre expertise repose sur l'utilisation d'une technique de séparation granulométrique permettant l'étude du nanoplancton calcaire. Le couplage de la géochimie isotopique (C et O) et organique (alcénones) des coccolithes nous permet d'envisager des approches novatrices dans les reconstitutions fines des paramètres océaniques de surface. En domaine littoral, le développement d'un modèle biologique sur les bivalves (ostréidés) nous offre la possibilité d'étudier la variabilité saisonnière climatique aux époques géologiques, méthodologie transposable en environnement dulçaquicole. En domaine continental, notre expertise se situe dans l'utilisation des restes fossiles de vertébrés et de l'environnement sédimentaire associé. L'approche couplée de la paléobiologie, de la biogéochimie et de la sédimentologie permet une lecture originale des environnements du passé dans des contextes géographiques souvent peu favorables aux reconstitutions. A ces développements originaux s'ajoute une expertise, commune à tous

les membres de l'équipe, en chimiostatigraphie à différentes échelles de temps. L'intégration des développements sur l'utilisation des biominéralisations aux enregistrements « classiques » de la géochimie sédimentaire nous permet de proposer un projet original articulé en 2 axes principaux, l'un (axe 1) concernant le développement méthodologique et l'expérimentation, l'autre (axe 2) les applications dans le registre fossile. L'arrivée du Pr. Pierpaolo Zuddas dans notre équipe en janvier 2012 nous permettra d'élargir nos approches en intégrant à nos problématiques, l'étude des mécanismes responsables des réactions cinétiques contrôlant la formation et l'altération des minéraux en conditions de basse température. Cette nouvelle approche constituera un axe transversal aux deux thèmes affichés dans notre projet du prochain contrat. Elle s'intéressera aux paramètres chimiques, physiques et biologiques associés à la circulation des fluides aqueux peu profonds par des observations de terrain intégrée à l'expérimentation en laboratoire et à la modélisation théorique des observations. Elle se focalisera sur les questions concernant la mesure et la prévision des vitesses de processus naturels, y compris l'altération chimique avec et sans intervention biologique. Le but affiché sera donc de contraindre les conditions environnementales de formation des minéraux en milieu sédimentaire.

Du point de vue structurel, l'équipe s'attachera à continuer de développer des interactions fortes avec les stations marines et le laboratoire LOCEAN de l'UPMC.

Axe 1 : Croissance, évolution et conservation des biominéralisations en relation avec leur environnement

Cet axe regroupe les approches expérimentales, les cultures en milieu contrôlé et les développements analytiques. Il concerne les bio-précipitations (contrôlées et/ou induites) de trois espèces minéralogiques les plus fréquemment rencontrées dans la nature : carbonatées, siliceux et phosphatées.

1-1 Processus de formation et de fossilisation chez les vertébrés

A- Evolutions taphonomiques des bioapatites (collaborations : IMPMC, LCMCP, BIOEMCO, MNHN)

Pour essayer de quantifier la part de bioapatite préservée, un ensemble de tests minéralogiques et chimiques de la carbonate hydroxylapatite en préalable aux analyses isotopiques sera réalisé. Une attention particulière sera portée sur $\delta^{18}\text{O}_{\text{PO}_4}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{CO}_3}$ et $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_3}$ pour reconstituer l'écologie des individus fossiles. La cristallographie des carbonates dans l'apatite est cependant complexe puisque plusieurs sites de substitutions ont été identifiés, localisés dans les canaux structuraux ou dans la « charpente » phosphatée. La spectroscopie infrarouge et la diffraction des RX permettent en particulier d'identifier la présence de groupes carbonates et d'estimer la « cristallinité » des échantillons. Les analyses élémentaires Ca, P, F, Mn, Fe, Sr, Ba et les terres rares sont également des critères indispensables pour caractériser la conservation de la nature biogénique des échantillons. Les éléments de transitions et les terres rares seront des indicateurs de l'influence du milieu sédimentaire. Cette analyse permet ainsi de réaliser une cartographie des perturbations diagénétiques au sein d'un échantillon et ainsi conduire une stratégie de micro-échantillonnage pour l'analyse des signaux primaires. Le développement d'une approche impliquant DRX, FTIR, RMN, analyse chimique élémentaire et isotopique, à l'étude d'échantillons biomimétiques et naturels actuels et fossiles conduira à mieux comprendre les processus de fossilisation.

B- Signaux isotopiques des coquilles d'oiseaux traceurs des milieux actuels et passés (collaborations : BIOEMCO, Oxford, INRA Tours)

Les mesures isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$) réalisées sur des biominéralisations continentales sont couramment utilisées pour reconstituer les environnements et les climats anciens. Ces mesures ont été plus particulièrement menées sur des coquilles d'œufs d'oiseaux fossiles préservées dans des sites archéologiques et des séries sédimentaires. Ces reconstitutions étant principalement basées sur le principe d'actualisme, il est important de cerner le rôle des facteurs exogènes (conditions climatiques, nourriture) et physiologiques sur la composition isotopique de la fraction minérale et organique des coquilles par l'établissement de modèles de fractionnements isotopiques. Ces modèles seront confrontés à des données collectées en milieu naturel et d'élevage afin de les rendre prédictifs et utilisables comme traceurs environnementaux actuels et passés.

1-2 Biogéochimie du nanoplancton calcaire

Les travaux réalisés et publiés lors du contrat précédent offrent à l'équipe Biominéralisation et environnement sédimentaires une large panoplie d'outils permettant de contraindre avec précision les températures des eaux de surface à partir de l'étude des coccolithophoridées (Haptophyta, Prymnesiophyceae). Ces outils concernent aussi bien les isotopes stables des coccolithes que les marqueurs organiques (alcénones) spécifiquement synthétisés par ces végétaux.

A- Calibration de nouveaux proxies «coccolithe» : *C. pelagicus* (collaborations : station biologique de Roscoff, Oxford)

L'équipe poursuivra les efforts de calibration des isotopes stables des coccolithes par une double approche de mise en culture en milieu contrôlé et de vérification en milieu naturel par l'étude de sédiments récents. L'espèce *Calcidiscus leptoporus* ayant déjà été calibrée (Candelier et al, version révisée), les efforts se porteront sur l'espèce *Coccolithus pelagicus* principalement, qui possède des caractéristiques similaires mais est retrouvée dans des environnements différents (plus haute latitude) et sur l'ensemble du Cénozoïque.

B- Paléothermométrie (T° absolues de la « mixed layer ») et bilan hydrographique ($\delta^{18}O_{sw}$) (collaborations : LSCE)

Cependant, dans certains contextes océaniques les tests de nannofossiles producteurs d'alcénones sont présents dans les sédiments, mais les alcénones eux, ont été totalement dégradés, empêchant toute reconstitution des SST. Nous nous proposons donc de comparer un autre marqueur univoque de la température, le Δ_{47} (Ghosh et al., 2006) en le mesurant sur les nannofossiles calcaires de la famille des Noelaerhabdaceae. Une fois les espèces productrices d'alcénones identifiées et isolées par la méthode de séparation de Minoletti et al. (2009), les mesures isotopiques de l'oxygène et du Δ_{47} seront effectuées et couplées aux données obtenues à partir de l' $U^{K'}_{37}$. Cette approche présente l'intérêt majeur de comparer les valeurs de températures déterminées à partir de ces deux thermomètres indépendants mais issus d'un même porteur.

1-3 Cristallisation et évolution des biominéralisations siliceuses

A- Les silicifications des lacs hyper-alcalins du rift Est-Africain (collaborations : MNHN, LISA, TERVUREN, LOCEAN)

Le sujet proposé concerne globalement l'étude de la genèse et de l'évolution temporelle de différents polymorphes de la silice déposés en milieux lacustres hydrothermaux. Dans de tels environnements, ces minéralisations, si elles se révèlent être d'origine biotique, pourraient s'avérer être de bons analogues actuels aux cherts précambriens ou aux silicifications observées sur la planète Mars. L'objectif de cet axe sera d'associer les observations sédimentologiques et minéralogiques fines aux données géochimiques afin 1- de caractériser les mécanismes de genèse des silicifications des lacs hyper-alcalins du rift Est-Africain (Kenya et Tanzanie) pour évaluer l'influence des micro-organismes dans les premières étapes de leur formation et 2- de discuter de leur validité comme analogues aux silicifications précambriennes et martiennes.

Les silicifications sur Mars, envisagées, par exemple, dans la région du Cratère Gusev, ont déjà été comparées à des produits hydrothermaux terrestres du type « sources thermales » d'Islande ou de Nouvelle Zélande. Dans les silicifications de ce type (*geysérite*), de nombreux micro-organismes se retrouvent pris dans une matrice siliceuse dont l'organisation stromatolitique atteste de leur rôle lithogénétique. Toutefois, ce type de silicification reste quantitativement très localisée et donc peu compatible avec l'ampleur des chertifications précambriennes.

Cependant, il existe d'autres analogues possibles comme les silicifications au sein des lacs de rifts continentaux. Bien que considérées par la majorité des auteurs comme résultant surtout de paragenèses minérales abiotiques, le rôle des bactéries a été envisagé dans la genèse de ces silicifications (Behr, 2002). L'étude de la transformation de silicates sodiques hydratés (précipitation directe de magadiite et de kenyaite) en polymorphes de la silice permettra d'y estimer le rôle des populations bactériennes. Les silicifications du rift peuvent couvrir des surfaces de plusieurs dizaines de km² sur des épaisseurs métriques, et constituer ainsi des analogues actuels plus compatibles avec les cherts précambriens et/ou extra-terrestres.

Le signal biogéochimique recherché est, dans cette étude, supporté par la cristallinité des polymorphes de la silice. La méthode essentielle concerne donc l'évaluation des défauts présents dans les réseaux des minéraux siliceux et en particulier dans le quartz. Les biominéraux montrent en effet des différences fondamentales avec leurs équivalents abiotiques au niveau des défauts qui affectent leur réseau, liés entre autres aux différences de vitesses ou cinétiques de cristallisations. Ce type d'approche a déjà été menée avec succès par l'équipe sur des phases minéralogiques carbonatées (Stalport et al. 2005, 2010, Beltran et al., 2009). Une approche biogéochimique incluant les mesures isotopiques du silicium sera menée afin de comparées les signatures portées par les différents polymorphes de la silice rencontrés sur le terrain.

B- Etude de la biosédimentation siliceuse dans l'océan Antarctique (collaborations : EPOC, LOCEAN)

L'océan Antarctique est le lieu d'une sédimentation siliceuse phytoplanktonique très intense. Les projets menés par le laboratoire LOCEAN de l'UPMC dans cette zone polaire permettent un suivi annuel des conditions physico-chimiques et biologiques de la glace ainsi que de la colonne d'eau, faisant de cette zone géographique un

laboratoire naturel instrumenté idéal pour l'étude biosédimentaire siliceuse. En effet, au large de la station Dumont d'Urville, l'étude des dépôts sur le plateau continental révèle des taux de sédimentation extrêmement élevés composés quasi exclusivement de diatomées. Cette sédimentation phytoplanctonique est très focalisée dans le temps puisqu'elle ne survient que lors de la débâcle estivale de la banquise. De plus, les datations au plomb et au thorium ont montré, pour l'année 2010 par exemple, un taux de sédimentation d'environ 20 cm/an ! Dans ce contexte biosédimentaire particulier, il est donc possible de suivre l'évolution minéralogique de la production siliceuse ainsi que l'ensemble de la production sédimentaire avec une précision rare. Ce projet, en association avec Guillaume Massé du LOCEAN, se focalisera sur l'étude des phases siliceuses depuis les populations phytoplanctoniques colonisant la glace jusqu'au sédiment en passant par les prélèvements dans la colonne d'eau. L'objectif sera à la fois de suivre les modifications annuelles de la cristallinité de la silice amorphe et d'inclure les flux saisonniers siliceux dans l'ensemble de la sédimentation (incluant les particules de siliceuses d'origine détritique). En parallèle, des observations préliminaires ont montrées que de la pyrite framboïdale se développait dans les frustules de diatomées sédimentées l'année précédente. La colonne d'eau n'étant a priori pas spécialement réductrice, il sera intéressant de comprendre les relations entre sulfatogenèse et matière organique au sein des fluides engagés dans les processus de diagenèse très précoce.

Axe 2 : Interactions Paléoclimats - Paléoenvironnements - Paléobiologie

Depuis 2005, les membres du LBES se sont spécialisés dans les reconstitutions des paléoenvironnements et des paléoclimats. Leur spécificité repose sur l'utilisation de proxies biologiques (biominéralisations) dont le développement se fait en équilibre avec le milieu de croissance, en domaine continental ou en domaine océanique. L'axe 2 de notre projet d'équipe propose de coupler les approches sédimentologiques et géochimiques sur différents types d'organismes biominéralisateurs (des microorganismes aux macrofossiles) afin de mieux caractériser les interactions entre la dynamique du milieu et la biosphère et ainsi d'analyser plus finement les changements des écosystèmes marins et continentaux qui sont le résultat de multiples interactions. Les transferts de matériel continent/océan, l'impact de l'environnement sur l'évolution biologique et la biodiversité et la reconstitution des environnements à des périodes clés de l'évolution climatique ou biologique de la planète seront abordés.

2-1 : Climats et environnements océaniques au cours du Cénozoïque

Une partie importante des travaux de l'équipe se focalisera sur le Cénozoïque, période clé de l'histoire climatique de la planète. En domaine marin, il s'agit d'une période au cours de laquelle les sédiments pélagiques carbonatés contiennent des proportions importantes de Noelaerhabdaceae et, selon la latitude, de Calcidiscaceae et de Coccolithaceae, trois taxons ayant fait l'objet de calibrations $\delta^{18}\text{O}$ -température (cf axe 1). Ce chantier consistera à reprendre l'étude des sites choisis pour établir les courbes paléoclimatiques globales (i.e. évolution du $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques; Zachos et al, 2008) en proposant, à partir de la géochimie du nannoplancton calcaire, une courbe de référence de la température des eaux de surface de l'atlantique nord. L'étude combinée du $\delta^{18}\text{O}$ des coccolithes (sous contrôle de la température et du bilan évaporation/précipitation local) et de l'indice de saturation des alcénones (marqueur univoque de température) permettra de déconvoluer les deux paramètres fondamentaux des environnements océaniques passés : température absolue et rapport isotopique de l'eau de mer ($\delta^{18}\text{O}_w$). Cette démarche, similaire à celle tentée avec plus ou moins de succès, sur les foraminifères planctoniques (avec la comparaison du rapport Mg/Ca et du $\delta^{18}\text{O}$ des tests) pourra également permettre de reconstituer les paléosalinités en relation avec les changements de circulation océaniques, les réorganisations paléogéographiques et les changements climatiques.

2-2 : Evolution des Vertébrés et paléoenvironnements

La mesure du $\delta^{18}\text{O}$ dans les phosphates des squelettes de vertébrés fossiles est une source d'information utile pour effectuer des reconstitutions paléoenvironnementales et paléoclimatiques comme par exemple, estimer des gradients latitudinaux de températures (Amiot et al., 2004). Cette approche nécessite toutefois de bien contraindre le métabolisme thermique (ectotherme ou endotherme) des fossiles utilisés, car les différences de température corporelle entre ces deux groupes d'organismes vivant à une latitude donnée se reflètent dans les $\delta^{18}\text{O}_{\text{PO}_4}$ de leurs squelettes (Fricke et al., 1998). Le type de métabolisme thermique des fossiles constitue donc un filtre qui va biaiser le signal isotopique enregistré dans les phosphates. Nos approches basées sur la paléohistologie (Cubo et al., 2012) montrent que, contrairement aux idées reçues, les ancêtres des crocodiles étaient probablement des organismes endothermes et non ectothermes. Nous proposons de tester cette hypothèse. Si elle n'est pas réfutée, il faudrait considérer certains fossiles du Mésozoïque apparentés aux crocodiles comme étant des endothermes, ce qui impliquerait de revoir l'interprétation du signal isotopique ainsi que les estimations paléoenvironnementales (climatiques ?) sur les gradients latitudinaux de températures du Mésozoïque.

Parallèlement, la biogéochimie isotopique ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_3}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{CO}_3}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PO}_4}$) de restes mammaliens sera utilisée pour reconstituer l'évolution climatique des environnements continentaux du Mio-Pliocène en Afrique orientale. Plus précisément, nous tenterons par ce type d'approche de reconstituer les milieux et les paysages dans lesquels est apparue la bipédie chez les hominidés dans des environnements où la géochimie des tissus minéralisés est une bonne alternative aux méthodes classiques de la paléontologie.

2-3 : Compréhension de la variabilité climatique haute fréquence à partir de l'analyse des archives sédimentaires

La compréhension de la variabilité du système climatique à partir de l'analyse géochimique des composantes biologiques et des archives sédimentaires à la surface de la Terre a constitué une des approches phare et innovante des travaux réalisés, lors du dernier contrat quinquennal par l'équipe BES. L'érosion chimique des roches, sensible aux conditions climatiques, représente un puits important du CO_2 atmosphérique. Ce mécanisme, par effet de rétroaction, aurait par conséquent joué un rôle majeur dans la régulation du climat global à l'échelle des temps géologiques. Il apparaît donc nécessaire de quantifier les mécanismes de l'érosion continentale, tant à l'échelle des temps géologiques qu'à l'échelle plus fine des variations climatiques rapides, pour appréhender son impact sur la machine climatique. Aussi, les systèmes turbiditiques, vastes épanchements sédimentaires présents aux débouchés des fleuves, constituent une zone d'accumulation préférentielle des produits de cette érosion dans les bassins océaniques. Dès lors, leur étude permet d'appréhender les modalités de l'érosion continentale et des transferts terre-mer en réponse aux variations climatiques.

A ce jour, aucune étude ne discute les effets des variations climatiques sur l'érosion et les transferts sédimentaires à l'échelle d'un cycle climatique complet, et plus particulièrement à l'échelle de la variabilité climatique millénaire de Dansgaard-Oeschger qui caractérise la dernière période glaciaire. Dans le cadre de cette thématique, nous proposons de caractériser l'impact des oscillations climatiques rapides sur l'érosion continentale et les transferts sédimentaires vers le domaine marin profond. Il s'agit ici non seulement de parfaitement contraindre dans le temps la variabilité haute fréquence des fluctuations climatiques par une approche isotopique à très haute résolution ($\delta^{18}\text{O}$, datations ^{14}C) de la sédimentation pélagique mais aussi de mieux comprendre l'origine et quantifier l'importance du détritisme continental en réponse aux oscillations rapides du système climatique (caractérisation minéralogique fines et analyses Nd/Hf, XRF etc...).

Au-delà de ces thématiques, la finalité des travaux de l'équipe BES sera de mettre en perspective les interactions entre les « cycles » d'intérêt majeur du projet global de l'ISTeP : cycles climatiques, cycles géochimiques, cycles paléogéographiques (ou paléocéanographiques) et cycles biologiques

Prospective de l'équipe DESIR : DEformations, Sismotectonique, Imagerie, Relief

Responsable : Olivier Lacombe

Permanents :

1 DR CNRS (M. Sébrier, DR2), 4 Professeurs (M. Fournier, PR2, P. Huchon, PRCE, O. Lacombe, PR1, B. Meyer, PRCE), 1 Professeur Associé (R. Michel), 1 Professeur à Temps Partiel (A. Rabaute), 5 Maîtres de Conférences (N. Bellahsen, N. Loget, N. Lybérès, F. Mouthereau (HDR), F. Rolandone).

Non-permanents:

Doctorants (M. Bigot-Buschendorf, A. Boutoux, Y-A. Chen, J. Corbeau, G. Graciani, L. Mesalles, M. Stab, C. Turrini, A. Vacherat)

Le projet fédérateur de cette équipe est d'étudier le comportement de la lithosphère depuis le court terme « séismogénique » jusqu'au long terme « géologique » et son couplage aux interfaces et avec les fluides. Les travaux de recherche s'organiseront autour de trois thèmes identifiés comme des problématiques de premier ordre :

- Interactions processus superficiels-processus profonds, rôle des fluides
- Sismotectonique et comportement court-terme de la lithosphère, imagerie
- Déformations et comportement long-terme de la lithosphère

Aborder ces problématiques nécessite une approche pluridisciplinaire et multiscalaire: l'équipe dispose d'une grande variété de compétences qui vont de la géomorphologie à la géophysique en passant par la géologie. Ces compétences seront mises en œuvre pour **acquérir des données pertinentes et contraignantes sur la durée, l'amplitude et la répartition des déformations de la lithosphère et sur les facteurs qui en contrôlent la localisation, afin de mieux comprendre la mécanique lithosphérique à différentes échelles de temps et d'espace, puis de la modéliser** en interactions avec les modélisateurs numériques de l'équipe LSD. Les dimensions des objets naturels étudiés seront très variables, depuis les frontières de plaques et les chaînes de montagnes (téthysiennes, et pro parte péri-pacifiques) jusqu'à l'échelle de la lame mince et du cristal ; leur étude permettra d'appréhender la rhéologie lithosphérique à des échelles de temps très différentes et donc complémentaires : plusieurs millions d'années pour la mise en place et l'évolution des grandes structures, 100.000 à 10.000 ans pour l'évolution des failles, quelques centaines à milliers d'années pour le cycle sismique, l'année pour les mouvements actifs mesurés par GPS.

Thème 1 : Tectonique, fluides et processus de surface

La formation et l'évolution des reliefs résultent de couplages complexes entre les déformations lithosphériques, les fluides et les processus de surface (érosion, sédimentation) modulés par le climat. Ainsi, la mise en place des réseaux de drainage, leur organisation géométrique et leur degré d'incision traduisent l'équilibre entre processus d'érosion/sédimentation et soulèvement. Les interactions fluides-roches dans les bassins entraînent des variations des propriétés pétrophysiques des roches, la migration des hydrocarbures et les concentrations de ressources minérales, la lubrification des failles, ... La caractérisation et l'intégration de ces couplages sont des points essentiels pour étudier l'évolution des paysages, la cinématique des failles, ou bien encore établir des bilans de matière et quantifier les flux des reliefs vers les bassins.

Interactions tectonique/processus de surface : forçage, héritage et croissance orogénique

Coordonnateurs / N. Loget et F. Mouthereau

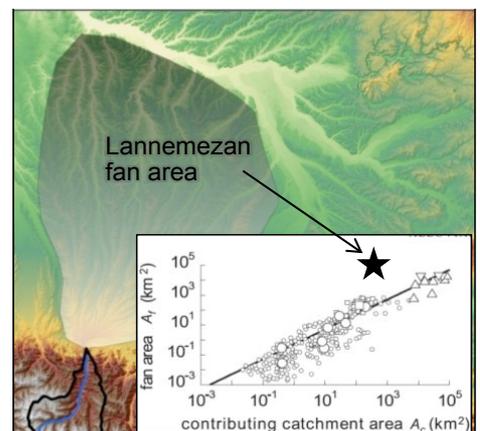
Autres C/EC de l'ISTeP : L. Segalen, J.-P. Suc

Collaborations externes : NCU Taiwan, ISTerre

Financement : ANR Pyramid, Action Marges, GRI Arctique

Problématique : Les orogènes peuvent-ils atteindre un état d'équilibre? Quelles sont les données pertinentes pour conclure? Comment contraindre l'altitude passée des chaînes de montagnes? Quel est le moteur de la croissance du relief en contexte post-orogénique? L'évolution des réseaux de drainage (croissance, incision, réorganisation) peut-elle être un marqueur de l'évolution tectonique?

Morphométrie du fan de Lannemezan. La compilation des mesures fans vs bassins versants indique que le bassin amont actuel n'explique pas seul la taille actuelle du fan (étoile noire). Ceci suggère des changements de condition de drainage ou de dynamique sédimentaire depuis 10 Ma.



Objectifs: Mieux comprendre l'évolution long-terme/court-terme de la topographie et des paysages orogéniques, en relation avec les processus profonds.

Outils: Analyse morphométrique des réseaux de drainage et des objets morpho-sédimentaires, SIG, modélisation des processus de surface, géochimie des isotopes stables, palynologie, thermochronométrie BT, bilans érosion-sédimentation, calculs de flux de matière.

Cibles: Pyrénées, Taiwan, Zagros, chaînes péri-Méditerranéennes, Brooks Range

Interactions fluides-fractures-roches dans les bassins sédimentaires

Coordonnateur / N. Bellahsen et O. Lacombe

C/EC : F. Mouthereau

Autres C/EC de l'ISTeP : L. Emmanuel, A. Verlaquet, B. Dubacq, P. Zuddas

Financement : ANR Pyramid, convention IFP

Problématique: L'histoire post-dépôt des bassins est contrôlée par l'enfouissement, les déformations et les circulations de fluides. Les fluides interagissent avec les roches et en modifient les propriétés physiques. La structuration à différentes échelles des bassins contrôle les circulations, et en retour les surpressions de fluides peuvent provoquer de la fracturation et permettre l'activation de failles mal orientées par rapport aux contraintes. Si les circulations dans les failles commencent à être comprises, les circulations à grande échelle et en zone complexe, comme les avant-pays des orogènes, sont encore mal documentées. On ignore ainsi le rôle des structures tectoniques sur la circulation des fluides à l'échelle du bassin, tout comme l'influence du style structural (thin- vs thick-skinned).

Objectifs: Déterminer l'origine et le timing des circulations des fluides (modèle paléohydrologique) ainsi que leur impact sur les déformations lors de l'évolution tardive des bassins (e.g, inversion).

Outils et approches: Analyses structurale (terrain) et microstructurale (microscopie, cathodoluminescence, MEB) des matrices et des veines/zones de failles; Analyse géochimique des ciments syn-tectoniques (isotopes C, O, Sr) pour caractériser la nature et l'origine des fluides et l'histoire des écoulements, et des inclusions fluides pour les conditions P-T. La quantification des paléocontraintes permettra de progresser dans la compréhension des couplages entre circulation de fluides, variations de pression de fluides, variations des contraintes tectoniques et déformations.

Cibles: bassin d'avant-pays nord-pyrénéen.

Thème 2 : Imagerie, tectonique récente, sismotectonique

Les études de tectonique récente/active permettent d'appréhender le comportement court-terme des failles et de la zone sismogénique. Cette approche est fondamentale pour la compréhension des processus géodynamiques et de la mécanique de la lithosphère ainsi que pour l'aléa sismique. Pour ces études, le signal topographique à plusieurs échelles spatiales est essentiel pour emboîter les différentes échelles temporelles. L'imagerie par télédétection joue donc un rôle fondamental, notamment pour la quantification des déformations pour peu que l'on puisse bien caractériser et extraire l'information contenue dans les séries d'images et en modéliser l'évolution temporelle. Ce thème propose d'aborder cette problématique à travers (1) des développements méthodologiques novateurs visant à dépasser les limites classiques des estimateurs des déformations en télédétection et (2) des études sismotectoniques intégrées d'exemples naturels (décrochements intracontinentaux, frontières de plaques) pour lesquelles l'équipe a un savoir-faire reconnu.

Télédétection et imagerie des déformations

Coordonnateur / R. Michel

C/EC : A. Rabaute, F. Rolandone, B. Meyer, P. Huchon, M. Fournier

Collaborations externes : Combinatoire et Optimisation/UPMC, IPGP, Caltech

Problématique : Les méthodes développées en télédétection pour extraire les déformations et le relief de séries d'images du sol prennent actuellement peu en compte les caractéristiques des milieux naturels. Ces outils présentent également des limites majeures, empêchant par exemple d'extraire l'essentiel de la déformation enregistrée par les systèmes radars. La recherche d'une description semi-classique des signaux géophysiques contenus

dans les images est justifiée d'une part parce que les limites actuelles se traduisent bien en termes classiques et d'autre part par analogie avec les développements récents exploitant les graphes quantiques dans d'autres domaines.

Objectifs : Il s'agit d'abord de proposer une approche physique pour lever l'ambiguïté modulo 2π des interférogrammes radars (déroulement de la phase), basée sur une analogie avec l'intégrale de chemin de Feynman (problème d'intégration 2-3 D dans le plan complexe, dont l'approche classique lagrangienne est limitée par les résidus et l'échantillonnage). A plus long terme, un modèle semi-classique des images des milieux naturels et de la déformation entre images sera développé. Ces développements seront appliqués à l'interférométrie radar en tectonique, aux signaux sonars en bathymétrie, à l'imagerie spectrale et à l'étude d'un sismomètre spatial pour les signaux optiques.

Approche: On travaillera par analogie avec les méthodes déjà développées pour la description de comportements semi-classiques dans des cas 2D au moins. La radiométrie des images, ou plutôt d'une transformée, servira à définir des graphes dont le comportement sera modélisé par l'équation d'onde.

Outils: Les outils théoriques à l'étude concernent essentiellement la théorie quantique des graphes et les formules dites de trace permettant de décrire l'image comme un système diffusant respectant l'équation d'onde. Les outils de télédétection déjà développés en imageries radar et optique pour la mesure des déformations serviront de support à ces développements.

Comportement des failles actives et cycle sismique

Coordonnateurs / F. Rolandone et B. Meyer
C/EC : M. Sébrier, R. Michel, P. Huchon
Collaborations externes : CEREGE, GéoAzur

Problématique : Le comportement sismogénique des failles actives reste mal compris: soit le glissement est asismique, soit il s'accompagne d'une libération d'énergie par séisme à peu près "régulière" (e.g., paléosismologie sur les failles majeures type San Andreas) ou avec un fort "clustering" (e.g., analyse d'escarpements de failles par cosmonucléides). Dans les zones de subduction, la cause et le degré du couplage sismique interplaque et ses variations latérales restent à préciser pour mieux appréhender l'aléa sismique.

Objectifs : Il s'agit d'apporter des contraintes précises et pertinentes pour caractériser le comportement mécanique des failles et de la lithosphère: (1) sur le taux de glissement et ses variations éventuelles et (2) sur le comportement sismogénique des failles actives. Les études géologiques seront couplées aux observations géophysiques pour prendre en compte la déformation instantanée et aborder les problèmes de déformation transitoire ou de % de glissement saccadé ou continu. Les développements méthodologiques sur l'utilisation couplée du ^{10}Be et ^{36}Cl seront poursuivis.

Outils : InSAR, GPS, paléosismologie en tranchées, datations par cosmonucléides.

Cibles : Décrochements du plateau iranien et du Sistan, subduction Pérou-Equateur

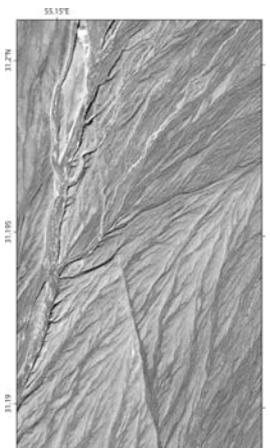


Image Quickbird de la trace de la faille d'Anar (Iran)

Sismotectonique des frontières transformantes

Coordonnateur / F. Rolandone
C/EC : B. Meyer, P. Huchon, N. Loget
Autres C/EC de l'ISTeP : S. Leroy
Collaborations externes : Univ. Madrid
Financement : Consortium Marges transformantes

Problématique: Contrairement aux grands décrochements continentaux, les marges transformantes ont été assez peu étudiées. En régime transpressif, on observe la croissance d'un prisme d'accrétion tectonique oblique au mouvement décrochant, puis une migration de la zone de rupture en profondeur, mais les causes et les modalités de cette évolution dans le temps, de la localisation des structures et du partitionnement de la déformation restent mal comprises.

Objectifs et cible : Le séisme d'Haïti du 12 janvier 2010 a eu lieu dans un contexte de collision oblique d'une partie épaissie de la croûte océanique caraïbe contre le bloc de l'île d'Hispaniola et la plateforme des Bahamas.

Mieux comprendre les systèmes transpressifs est donc un enjeu crucial pour appréhender l'aléa sismique. L'objectif est d'étudier les déformations actuelles et récentes de la frontière Nord Caraïbe et plus particulièrement de la zone en relais compressif d'Hispaniola (cartographie des escarpements et segments de failles actifs, déformations récentes/co-sismiques des sédiments), en lien avec la cinématique AmN et Caraïbe.

Outils : Géophysique de surface (bathymétrie multifaisceaux, sondeur de sédiments, sismique rapide, flux de chaleur) et carottages ciblés, sismique grand-angle, stations sismologiques.

Marqueurs de surface de la déformation active

Coordonnateurs / A. Rabaute et M. Fournier

C/EC : R. Michel, P. Huchon, N. Loget

Autres C/EC de l'ISTeP : E. d'Acremont, C. Gorini, L. Le Pourhiet, J. Poort

Collaborations externes : ENS

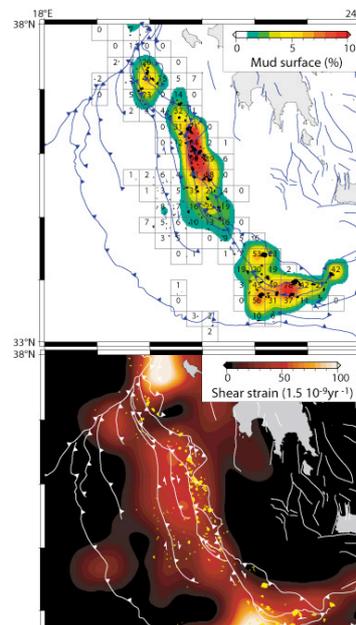
Financement : GEM (Global Earthquake Model)

Problématique: Quels sont les marqueurs de surface de la déformation active et de l'évolution des reliefs sous-marins? Quelles sont les relations entre ces marqueurs et les processus géodynamiques aux frontières des plaques, notamment en domaine marin et à la jonction terre-mer ?

Objectifs : volcanisme de boue (provenance, mécanismes et récurrence des expulsions, localisation par rapport à la géométrie des failles actives et de la limite prisme d'accrétion/butoir rigide, incidence sur l'état de contrainte et lien avec le cycle sismique) et glissements de terrain (mécanismes, récurrence et potentiel tsunami-génique, impact sur l'évolution des reliefs).

Outils et méthodes d'étude : Imagerie de surface et de sub-surface (imagerie et interférométrie radar, imagerie bathymétrique multifaisceaux et réflectivité, sondeur de sédiment 3.5 kHz, sismique 2D/ 3D), carottages, magnétisme, modélisation numérique.

Cibles : Golfe de Cadiz, ride Méditer., marge nord-africaine, ride d'Owen.



Relation entre volcanisme de boue et déformation sur la ride Méditerranéenne

Thème 3 : Déformations et rhéologie de la lithosphère continentale

Les déformations lithosphériques sont contrôlées par (1) les conditions aux limites cinématiques, mais également (2) la nature et la structure de la lithosphère (e.g., jelly sandwich/crème brûlée), son état thermique et sa pré-structuration au moment du rifting ou de l'orogénèse, mais avec des contributions relatives mal définies. On s'attachera tout d'abord dans ce thème à **caractériser et quantifier les déformations long-terme** et à **en préciser les facteurs localisants**. A petite échelle, on précisera les rôles respectifs de la lithologie, des conditions P-T et des fluides pré-/syn-orogéniques dans la rhéologie crustale dont la localisation/distribution de la déformation et les mécanismes mis en jeu dans les zones de cisaillement sont d'excellents marqueurs. A grande échelle, un **objectif ambitieux est d'établir un modèle prédictif liant les propriétés thermomécaniques héritées des continents et leurs déformations dans les zones de convergence ou de divergence**. Caractériser la rhéologie requiert aussi une bonne connaissance des relations contraintes/déformations. Si les orientations des contraintes actuelles sont connues, ce n'est pas le cas de leurs magnitudes. Les estimations quantitatives sont pourtant au cœur des problématiques fondamentales comme appliquées (aléa/prospection/génie civil). Le second objectif est de progresser dans la **quantification des (paléo) contraintes**, afin de valider les prédictions, et donc les rhéologies utilisées dans les récents modèles numériques de plis, de chaînes plissées d'avant-pays ou de bassins sédimentaires.

Mécanismes de déformation de la croûte dans les orogènes, de la surface et à la transition cassant-ductile

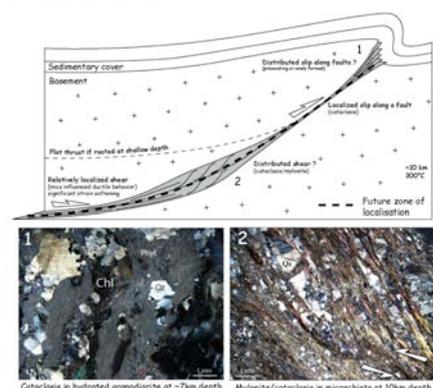
Coordonnateur / N. Bellahsen

C/EC : F. Mouthereau, O. Lacombe

Autres C/EC de l'ISTeP : A. Verlaquet, L. Labrousse, C. Rosenberg, B. Dubacq, L. Le Pourhiet

Collaborations externes : ISTO, GeoAzur

Financement : ANR Pyramid, ERC Rheolith



Objectifs : Etudier la dualité localisation/distribution de la déformation à travers deux exemples en contexte de collision, pour mieux contraindre la rhéologie de la croûte, de la surface jusqu'à la transition cassant-ductile. L'étude portera sur des roches déformées à des profondeurs variables, afin de préciser les profils rhéologiques et leur évolution dans le temps et selon la déformation finie, ainsi que sur le rôle des fluides (e.g., adoucissement).

Modèle conceptuel de zone de cisaillement dans la croûte supérieure et régimes de déformation associés

Outils: Analyses structurale (terrain) et microstructurale (microscopie, cathodoluminescence, MEB), coupes équilibrées, géochimie (isotopes stables, éléments traces), inclusions fluides, géochronologie, thermobarométrie, mécanique des roches, modélisation thermo-mécanique.

Cibles: Alpes, Pyrénées

Héritage rhéologique et processus orogéniques

Coordonnateur / F. Mouthereau

C/EC : N. Bellahsen, O. Lacombe, N. Lybérès

Autres C/EC de l'ISTeP : E. Burov, L. LePourhiet

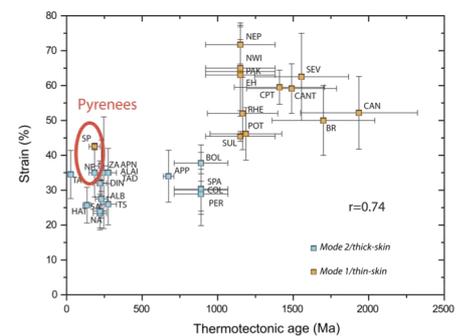
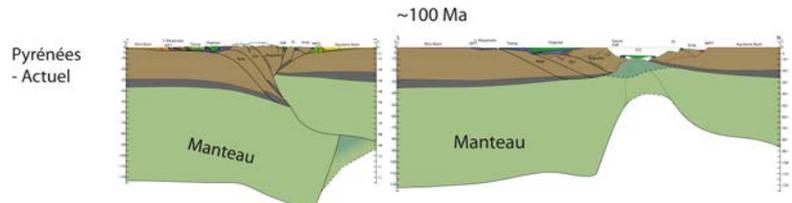
Collaborations externes : CRPG, ISTerre, Univ. Bergen

Financement : ANR Pyramid, ERC Rheolith, PHC Taiwan, LIA France-Taiwan

Problématique: Les variations du style des déformations compressives et du raccourcissement long-terme résultent-elles de variations des conditions aux limites ou de l'héritage thermo-tectonique? Quel rôle joue le manteau? La croûte profonde peut-elle être un niveau de découplage majeur? Les variations latérales de la géométrie initiale de la marge influent-elles sur l'évolution de la subduction continentale?

Outils: Modélisation cinématique des coupes équilibrées, T_{max} (Raman), thermochronométrie, thermobarométrie BT, pétrographie, stratigraphie des séries synorogéniques, modélisation thermo-mécanique.

Cibles: Pyrénées, Zagros, Taiwan, Alpes, Kopet Dagh



Raccourcissement vs âge thermotectonique de la lithosphère dans les zones externes des orogènes. Les Pyrénées correspondent à une lithosphère thermiquement jeune, chimiquement enrichie et dense.

Quantification des paléocontraintes dans les orogènes et les bassins sédimentaires

Coordonnateur / O. Lacombe

C/EC : N. Bellahsen

Collaborations externes : IFPEN, Univ. Orsay

Financement : Convention IFPEN, ANR Pyramid

Objectifs : Les paléocontraintes reflètent les contraintes anciennes pendant la déformation. L'équipe a un savoir-faire reconnu dans le développement et l'application de techniques paléopiézométriques comme l'analyse des macles de la calcite et sa combinaison avec l'étude de la fracturation et de la mécanique des roches pour la quantification des paléocontraintes dans les chaînes plissées. L'objectif méthodologique est d'améliorer le paléo-piezomètre calcite : optimisation de la collecte des données par EBSD, meilleure calibration du seuil de maclage par essais mécaniques sous MEB, amélioration du processus d'inversion. La technique sera appliquée en routine dans les chaînes plissées et les bassins, ce qui fournira un contrôle sur la rhéologie aux grandes échelles de temps et sur les (micro)mécanismes de déformation impliqués.

Cibles : Rocheuses canadiennes, avant-pays nord-pyrénéen

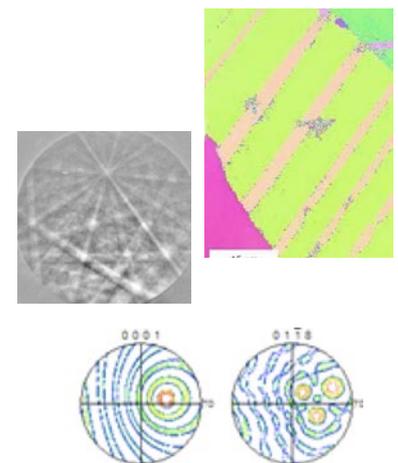


Diagramme de diffraction et image/données d'orientation obtenus par EBSD sur un cristal de calcite maclé

Prospective de l'équipe « Evolution et modélisation des bassins sédimentaires »

Responsable : Catherine Homberg

Personnels Enseignants-chercheurs et Chercheurs permanents* : Eric Barrier (CR1, HDR), François Baudin (PR1), Françoise Bergerat (DR1), Marie-Françoise Brunet (CR1, HDR), Slah Boulila (MCF), Bruno Galbrun (DR2), Christian Gorini (PR2), Catherine Homberg (MCF, HDR), Eva Moreno (MCF MNHN), Jeffrey Poort (IR), Laurent Riquier (MCF), Johann Schnyder (MCF), Bruno Vrielynck (CR1, HDR).

Personnels IATOS-BIOATOS*(fortement impliqués dans EMBS) : Jean-François Brouillet, Isabelle Morgant, Florence Savignac.

Personnels non permanents*: Jean Letouzey (Coll. bénévole), Jean-Pierre Suc (DR Emérite), une dizaine de doctorants et post-doctorants, Chercheurs invités.

**Liste prévisionnelle, début du contrat quinquennal 2014-2018*

1. Nature et attendus du projet

Les recherches que l'équipe Evolution et Modélisation des Bassins Sédimentaires (EMBS) se propose de développer au sein de l'iSTeP pour le contrat quinquennal 2014-2018 sont présentées ci-dessous. L'équipe se donne pour mission de contribuer à la progression des connaissances sur les bassins sédimentaires, actuels ou anciens. Pour ce faire, elle développe une recherche originale et dispense une formation par la recherche principalement auprès des étudiants en Sciences de la Terre (ST). Son champ d'action est celui de la recherche fondamentale, avec une implication forte sur des questions sociétales, principalement d'ordre environnemental et énergétique. Son action est envisagée à travers des programmes de recherche (nationaux et internationaux) et avec les partenaires industriels des ST. Les attendus de cette activité se déclineront sous forme de publications (revues, rapports internes pour partenaires), de communications orales (congrès scientifiques, journées grand public), et de « délivrables » spécifiques (e. g., bases de données, cartes thématiques,...).

Pour ce quinquennat, l'équipe se positionne sur trois axes de recherche: (1) l'évolution tecto-sédimentaire des bassins, (2) la fracturation des séries qui remplissent ces bassins au regard de l'hétérogénéité de ces dernières et (3) les forçages climatiques et astro-climatiques sur le remplissage des bassins sédimentaires.

2. Les acteurs et le contexte

L'équipe EMBS comportera au début du prochain contrat 12 chercheurs et enseignants-chercheurs et un ingénieur de recherche avec qui trois autres IATOS travaillent étroitement. L'équipe a 5 ans et demi d'existence et a été créée sous la volonté de regrouper plusieurs compétences autour du domaine des bassins sédimentaires. L'historique de l'équipe est détaillé dans la partie bilan. Notre analyse est que la cohésion de l'équipe est acquise. Ainsi, les actions communes engagées à partir de 2007 trouvent leur prolongation naturelle dans ce nouveau quinquennat et nous pensons que le contexte est favorable à en renforcer certaines et à en développer de nouvelles. L'équipe trouve aussi un cadre favorable dans l'iSTeP pour développer d'autres projets de recherche en bénéficiant de compétences complémentaires (cf. bilan). Enfin, à une échelle plus large les membres de l'équipe sont fortement impliqués dans des programmes de recherche nationaux et internationaux (voir ci-dessous).

Le contexte actuel de raréfaction des ressources énergétiques carbonées et l'affichage d'une volonté de traiter les résidus de la production industrielle (CO₂, déchets nucléaires) constituent un tournant fort de nos sociétés. L'activité d'exploration (recherche de nouvelles provinces pétrolifères) est (pour au moins un moyen terme) soutenue et les questions sous-jacentes aux domaines des ressources non conventionnelles, des énergies renouvelables (e.g., géothermie) et du stockage des déchets sont nombreuses et souvent communes à celles posées par la recherche fondamentale. Les bassins enregistrent par ailleurs des processus fondamentaux aux ST (enregistrement du climat, du relief, du temps, de la déformation/comportement mécanique des roches, de la production des sédiments organiques ou minéraux; liste non exhaustive). Si elle l'a toujours été, l'étude des bassins sédimentaires (renfermant ces ressources et aussi lieu éventuel de stockage) se place de plus en plus comme une nécessité, avec un champ de progression fort.

L'équipe EMBS a la possibilité de contribuer significativement à certains des champs de progression traitant des bassins sédimentaires. Parmi les atouts/spécificités qui caractérisent notre équipe, on peut noter : (1) des spécialités diverses couvrant les domaines de la tectonique, de la sédimentologie et de la physique des roches, (2) un savoir-faire reconnu dans la documentation (et l'analyse) fine des objets et dans l'intégration de ces données pour l'élaboration de synthèses régionales et géodynamiques (à travers les programmes MEBE et DARIUS), (3) une expertise notable dans

la détermination des paléocontraintes à partir de l'observation- analyse des failles et autres fractures et (4) l'usage commun de la double approche naturaliste et modélisatrice (en utilisateur). Nous avons une forte expérience des collaborations avec les partenaires du monde pétrolier (Consortium DARIUS, projets bilatéraux avec des industriels comme responsable principal ou participants) et une collaboration croissante avec les acteurs du stockage (ANDRA et IRSN). Nous sommes aussi fortement impliqués dans les programmes nationaux qui traitent des bassins sédimentaires (ANR, Action Marges, TERMEX en leaders, implications dans d'autres). Notre activité implique des collaborations nationales et internationales (cf bilan). A ces facteurs en notre faveur s'oppose le départ en retraite de trois chercheurs lors du prochain contrat et que l'équipe doit pouvoir anticiper. Nous espérons en conséquence un soutien de nos tutelles pour le recrutement de jeunes chercheurs/enseignants-chercheurs afin que notre équipe maintienne sa dynamique, son originalité (aux frontières entre la tectonique, la sédimentation et le climat) et sa force de proposition dans le domaine des bassins sédimentaires.

3. Principaux axes du projet de recherche

Les bassins sédimentaires sont des objets complexes qui recèlent les meilleurs enregistrements des événements et processus géologiques. Dans leur état fini (actuel), ils affichent une structure clairement tridimensionnelle, avec une forte variabilité spatiale de leurs caractéristiques (sédimentologiques, pétrophysiques, mécaniques,...). Les difficultés à avoir ici une approche déterministe découle de cette architecture interne fortement hétérogène, cette dernière résultant de la superposition de différents processus (tectonique des plaques, changements climatiques, magmatisme,...), les paramètres sous-jacents pouvant par ailleurs avoir des effets antagonistes. Les questions scientifiques restent multiples et les enjeux suivants sont parmi ceux qui guident notre approche:

(1) Quels sont les liens entre processus de surface et processus lithosphériques/géodynamiques dans l'évolution des bassins sédimentaires ?

(2) Quels analogues et quelles approches peut-on proposer pour préciser les réseaux de fractures partiellement imagées en sismique qui découpent et parfois connectent les séries sédimentaires des bassins?

(3) Quelles archives paléo-climatiques peuvent fournir des contraintes fortes sur les modèles d'évolution climatiques prévisionnels?

Ces questions trouvent leurs racines dans notre compréhension encore partielle de certains processus des ST, dont par exemple le transport du matériel sédimentaire, la croissance des failles dans ces sédiments, ainsi que les limites de certains de nos outils (paléo-chronomètre, signal sismique,...). Pour le quinquennat à venir, nous focaliserons notre recherche sur trois axes comme décrits ci-dessous.

VOLET 1 : PALEO-BASSINS ET LEUR EVOLUTION TECTONO-SEDIMENTAIRE

Les marges continentales ainsi que les bassins sédimentaires intracontinentaux et intra-montagneux représentent les meilleures et les plus complètes archives de l'histoire de la Terre. En effet, la structure et l'évolution des bassins sont soumises à plusieurs processus interagissant de manière complexe. La tectonique des plaques (*slab-pull*, délamination, collision,...) se répercute très loin et s'enregistre dans les bassins quelle que soit leur nature. Les changements climatiques globaux et locaux contrôlent l'érosion et le transport de matière et les conditions d'accumulation. L'état thermique, la rhéologie de la lithosphère, le magmatisme, le transfert des fluides jouent également un rôle important dans la modification de la structure et l'évolution des bassins. Les enjeux scientifiques et sociétaux sont multiples. Ce volet se propose, en particulier, d'aborder les thèmes suivants:

1. Formation et déformation des bassins sédimentaires jusqu'à leur inversion

La lecture de l'enregistrement sédimentologique, stratigraphique et tectonique permet de reconstituer l'histoire géologique d'un bassin sédimentaire. Quelques questions pertinentes se posent: (1) La lecture du signal stratigraphique peut-elle caractériser la continuité ou la discontinuité d'un signal tectonique? (2) Quelle est la relation entre les processus profonds et les processus de surface (du Moho à la para-séquence)? (3) Quelle est la relation entre les processus tectono-sédimentaires à différentes échelles de temps [séismes et turbidites/slumps (échelle locale, à haute fréquence, quelques heures) et la formation, l'évolution et la déformation d'un bassin (à l'échelle du bassin, de la subsidence, quelques millions d'années).

C'est à travers des chantiers régionaux ciblés (l'Asie centrale, les bassins Méditerranéens, les marges du Brésil, l'Arctique) que nous comparerons les caractéristiques tectono-sédimentaires des bassins, dans des contextes géodynamiques variés, de façon à comprendre les processus de formation et d'évolution de ces bassins et de nourrir les modèles numériques ou analogiques. Nos outils sont ceux de la sédimentologie (terrain, carottages), de la géologie structurale (analyse des déformations des séries sédimentaires, étude des paléo-contraintes, subsidence) et de la

géophysique haute résolution (bathymétrie THR, sismique réflexion, imagerie acoustique, sismique pétrolière et grand angle). La modélisation numérique nous permettra de tester les modèles géologiques proposés à partir de l'observation. La visualisation 3D des bassins sédimentaires à l'aide de géomodeleurs et de SIG et l'approche quantitative sera une des priorités de développement au sein de notre équipe. L'élaboration de synthèses régionales d'évolution de bassins et de chaînes de montagnes, dans le cadre de programmes en relation avec l'industrie pétrolière et/ou lors de la réalisation d'atlas palinspastiques, paléotectoniques, paléogéographiques et stratigraphiques, sera une des actions importantes pour identifier et comprendre à l'échelle des plaques lithosphériques les processus à l'origine de la formation et de la déformation des bassins sédimentaires. Ces synthèses permettront en outre de proposer des modèles cohérents d'interaction entre les interfaces asthénosphère/lithosphère/atmosphère.

2. Les transferts sédimentaires et leurs forçages sur les marges continentales actuelles.

La variation des transferts de matière qui caractérisent les grands bassins sédimentaires est liée à des processus variés (mouvement verticaux parfois extrêmement rapides, variations climatiques, capture ou déconnexion de bassins versants, eustatisme, circulations océaniques, remobilisation des sédiments dans de grands événements gravitaires). La caractérisation et la quantification de ces processus et de leur interaction est essentielle pour mieux comprendre comment ils interagissent avec la structuration et l'évolution d'une marge et d'un bassin.

Par exemple, nous souhaitons comprendre les mécanismes de construction des accumulations turbiditiques et/ou contouritiques actuelles de façon à proposer un modèle architectural associé à un modèle de distribution des lithofaciès qui pourra servir d'analogie prédictif et applicable à des formations sédimentaires similaires fossiles. Cette vision intégrée dans le temps et dans l'espace, terre-mer, *source to sink*, ancien versus actuel est spécifique à notre équipe composée de diverses spécialités. Là encore nos outils sont ceux de l'analyse sédimentologique, stratigraphique et structurale (géologie de terrain et géophysique marine). Les modèles numériques de terrain permettront de tester les modélisations analogiques et/ou numériques 3D, de faire les bilans d'érosion, de transfert et de dépôt des sédiments (e.g. avec Dionisos) et de comprendre les interactions entre climat-relief-eustatisme.

VOLET 2 : FRACTURATION VERSUS HETEROGENEITE DES SEQUENCES

Ce volet a pour but d'appréhender la fracturation présente dans les séries sédimentaires et avec un regard particulier sur les relations qui relient la fracturation-déformation à la variabilité des dépôts qui constituent les bassins sédimentaires. A l'échelle des séquences, ou de quelques unités lithologiques, le réseau de fractures (failles et autres discontinuités mécaniques) montre une forte variabilité, entre autres de densité, de direction, de forme, et parfois se superposent des modes de déformation continue (e.g., plis, déstabilisations du sédiment...). La complexité de l'architecture interne des failles ou réseaux, impliquant des connections entre les séries sédimentaires ou au contraire des fractures confinées, traduit celle des mécanismes de déformation et des différentes échelles de temps impliquées. L'accent sera donné sur l'aspect 3D des mécanismes sous-jacents à la formation/croissance de ces réseaux de failles. Nous envisagerons d'aborder deux aspects de la déformation des séries sédimentaires :

1. Relation multi-couches et réseaux de fractures

Nous nous intéresserons à caractériser les failles et réseaux de fractures traversant des milieux multi-couches. A l'échelle décimétrique à métrique, il s'agit par exemple de séries composées d'alternances de niveaux différents, comme des alternances d'unités calcaires et d'unités argileuses. A cette échelle, l'approche de terrain permettra la documentation fine des caractéristiques des réseaux de fractures. Outre la cartographie des différentes fractures, l'étude de certains attributs de failles (point arrêt, évolution des déplacements tout au long d'une faille, segmentation,...) permettra d'extraire les différentes étapes de croissance des failles et les processus qui y sont liés : leur nucléation, leur propagation, leur arrêt forcé (e.g., par une interface sédimentaire), l'évolution du système de fractures lorsque la propagation verticale est ainsi stoppée (phase de restriction), le passage éventuel de cette restriction. Le champ de progrès dans le rôle du multi-couche sur les caractéristiques du réseau de fractures est important car il n'a été abordé que récemment. Notre approche et notre originalité sont de combiner l'étude de terrain des systèmes fracturés naturels et des unités lithologiques qui constituent le multi-couche (en leader), la caractérisation des paramètres mécaniques des unités (propriétés élastiques, de rupture, en collaboration) et la modélisation numérique de la fracturation (en leader). Parmi les nouvelles approches que nous serons amenés à développer, un accent sera donné sur les méthodologies aptes à caractériser la déformation dans les argiles. Entre autres, nous proposons d'aborder les phénomènes de déformation dans les argilites, souvent difficilement caractérisables par l'approche macroscopique, par la méthode d'anisotropie de susceptibilité magnétique. Aussi, un effort sera donné pour obtenir une caractérisation tri-dimensionnelle des structures à la faveur d'affleurements propices ou de données sismiques 3D (échelle hecto- kilométrique), suivant les opportunités.

2. Déformations ultra-précoces

Les déformations précédant la lithification complète des séries sédimentaires seront étudiées à partir d'exemples spécifiques. Nous les aborderons tout d'abord par l'étude de failles naturelles dont la géométrie détaillée et les structures propres sont observables sur le terrain. Ici, une analyse de type macro-structurale originale est à mettre en œuvre et nous la combinerons à un examen micro-structural. Un de nos chantiers privilégié sera le bassin du Sud-Est où nous souhaitons aussi documenter des périodes-clé de l'évolution de ce bassin et nous visons à développer ces approches à d'autres contextes. L'approche de susceptibilité magnétique mentionnée plus haut sera aussi appliquée pour l'identification des paléoséismes dans les sédiments, entre autres à travers des exemples aux Antilles.

VOLET 3 : FORÇAGES CLIMATIQUES ET ASTRO-CLIMATIQUES

Ce dernier volet vise à décrypter l'expression sédimentaire des forçages climatique et astro-climatique sur les paléo-environnements, tant marins que continentaux. L'objectif est de comprendre les facteurs régissant la variabilité climatique à toutes les fréquences de temps (de quelques centaines/milliers d'années à plusieurs Ma).

Les thèmes suivants seront ainsi abordés :

1. La variabilité climatique à très haute fréquence (précession et infra-précession).

Les périodes concernées sont les périodes récentes (e.g. Pléistocène et l'Holocène) et quelques intervalles clés du Mésozoïque (Crétacé et Jurassique) et du Paléozoïque (Dévonien et Permien). Pour la période du Quaternaire, un intérêt particulier sera porté sur les régions tropicales (baie du Bengale, marges arabe et africaine). Deux aspects seront abordés à travers l'analyse géochimique (inorganique et organique) et du magnétisme des roches de carottes de sédiments marins: les variations d'apports détritiques (éoliens et fluviaux), afin de reconstituer les fluctuations de l'intensité de la mousson d'été et d'hiver, et la caractérisation de la matière organique comme marqueur de paléoproduktivité. Notre approche permettra de traiter de la fenêtre de temps correspondant aux cycles astronomiques mais aussi d'accéder à l'échelle de quelques centaines d'années.

De courts intervalles stratigraphiques du Mésozoïque seront sélectionnés, sur lesquels nous prévoyons de documenter les différentes cyclicités orbitales à haute fréquence (cycles d'excentricité de ~100 ka, d'obliquité de ~40 ka, de précession de ~20 ka, voire d'infra-précession) au travers d'une approche pluri-disciplinaire (magnétisme, géochimie organique et inorganique) à très haute résolution. Ces résultats, comparés à ceux sur les sédiments récents, permettront de mieux comprendre les modalités du forçage orbital sur les cycles biogéochimiques (cycle global du carbone en particulier) et eustatiques en périodes "icehouse" cénozoïques et "greenhouse" mésozoïques. Les principaux chantiers d'étude sont le Bassin du Sud-Est, le Bassin de Paris, l'Offshore Newfoundland. Toutes les études cyclostratigraphiques menées ici pourront être utilisées pour la calibration astronomique des intervalles étudiés, et ainsi contribuer à une telle calibration des temps géologiques, thème récurrent de notre équipe, leader national en la matière.

2. Variabilité climatique de long terme et perturbations climatiques brutales.

L'impact des variations du climat à plus long terme sur les caractéristiques des séquences de dépôts sera plus spécifiquement étudié à travers l'analyse de différents environnements, marins, mais aussi continentaux. Par exemple, en domaine pélagique, un de nos chantiers sera de comprendre l'influence du climat sur l'architecture du cône sous-marin profond du Congo au Quaternaire. Des formations mésozoïques seront aussi étudiées, les alternances marno-calcaires et marneuses du Jurassique dans le Bassin du Sud-Est et le Bassin de Paris, notamment. Le rôle fondamental des cyclicités orbitales dans les évolutions paléoenvironnementales et les cycles bio-géochimiques à l'échelle du million d'années (e.g., modulations en amplitude et en fréquence) sera examiné. Les environnements continentaux, très sensibles aux fluctuations climatiques (e.g., les lacs) et très utiles pour les modèles numériques paléoclimatiques mais longtemps négligés, seront étudiés pour des périodes-clés de l'histoire paléoclimatique de la Terre comme la limite Eocène-Oligocène ou encore le Toarcien. Une approche intégrée alliant outils organiques et isotopiques (sur MO et sur carbonates), ainsi que la minéralogie des argiles sera adoptée sur ces derniers chantiers. Nous tenterons enfin un développement méthodologique en testant les isotopes de l'azote des matières organiques terrestres en tant que potentiel nouveau marqueur paléoclimatique.

Parmi les différentes perturbations climatiques de courte durée, les OAEs enregistrés au cours du Paléozoïque et surtout au Mésozoïque feront l'objet d'études multi-proxies (sédimentologique, géochimique, magnétique, cyclostratigraphique) et les données obtenues seront analysées et comparées pour en comprendre les origines climatiques et océanographiques (Sibérie, secteurs téthysiens). Nous nous intéresserons plus particulièrement (1) aux interactions entre les différents facteurs environnementaux contrôlant ces OAEs, (2) à l'estimation des durées de ces

événements et (3) à la recherche d'un éventuel contrôle astronomique. Le PETM sera aussi une de nos cibles en tant que perturbation climatique de courte durée et son impact sur les environnements continentaux.

4. Mise en œuvre, moyens, évolution

Les thèmes de recherche décrits ci-dessus seront mis en œuvre à l'appui des compétences internes à l'équipe EMBS, avec le soutien de collaborations et de programmes de recherche dont les membres de l'équipe ont l'expérience. L'équipe fait aujourd'hui le bilan de moyens humains, financiers, contextuels à notre sens favorables (cf 2.), mais notre projection nous amène à intégrer que nous sommes dans un tournant clef. La nécessité de maintenir et de renforcer un savoir-faire sur l'analyse/l'inversion des failles (trois départs à la retraite dans le domaine de la tectonique cassante), est partie intégrante de notre devenir. Une compétence en termes de modélisation stratigraphique viendrait par ailleurs avantageusement renforcer nos activités. Nous soulignons aussi que notre travail s'appuie sur une composante analytique (analyses sur MO, sur argiles, magnétisme des roches, cf *dossier général UMR*) et une aide de technicien sur la préparation des échantillons nous fait défaut. Nous anticipons aussi sur des besoins de soutien pour l'acquisition de matériels attachés à notre recherche (Rock-Eval RE7, entre autres).

Prospective de l'équipe « Lithosphère, structure et dynamique » (LSD)

Les enjeux modernes de la tectonique concernent *les relations entre déformation de la lithosphère et dynamique du manteau*. L'ancienne équipe LPP s'était engagée dans cette voie en développant une démarche combinant travaux de terrain (analyse de la déformation et relation avec le métamorphisme, le plutonisme et les bassins sédimentaires), des données géophysiques nouvelles (en particulier, sismique réflexion, réfraction, et tomographie de la lithosphère) et la modélisation thermo-mécanique (numérique). La mécanique de la lithosphère et, plus particulièrement, le comportement rhéologique des roches et des litages qu'elles constituent à l'échelle de la lithosphère, demeure au cœur de nos préoccupations. Elle est le lien indispensable entre l'analyse des données géologiques, géophysiques et la modélisation des processus.

Nous souhaitons poursuivre notre démarche sur les mêmes bases que celles suivies jusqu'à présent c'est-à-dire dans le cadre de contrats de recherche (ANR, INSU, ERC...), de collaborations nationales, internationales et industrielles (pétrole, mine).

« **Forces** » : Equipe à productivité élevée, à visibilité internationale reconnue et opérant sur des sujets et des objets variés. L'équipe a bénéficié d'un rajeunissement (4 nouveaux recrutements) et d'une consolidation de personnels (2 promotions).

« **Risques** » : Un renforcement technique serait souhaitable pour maintenir notre efficacité, notamment dans le domaine du traitement de la sismique réflexion-réfraction et de la pétrologie de terrain.

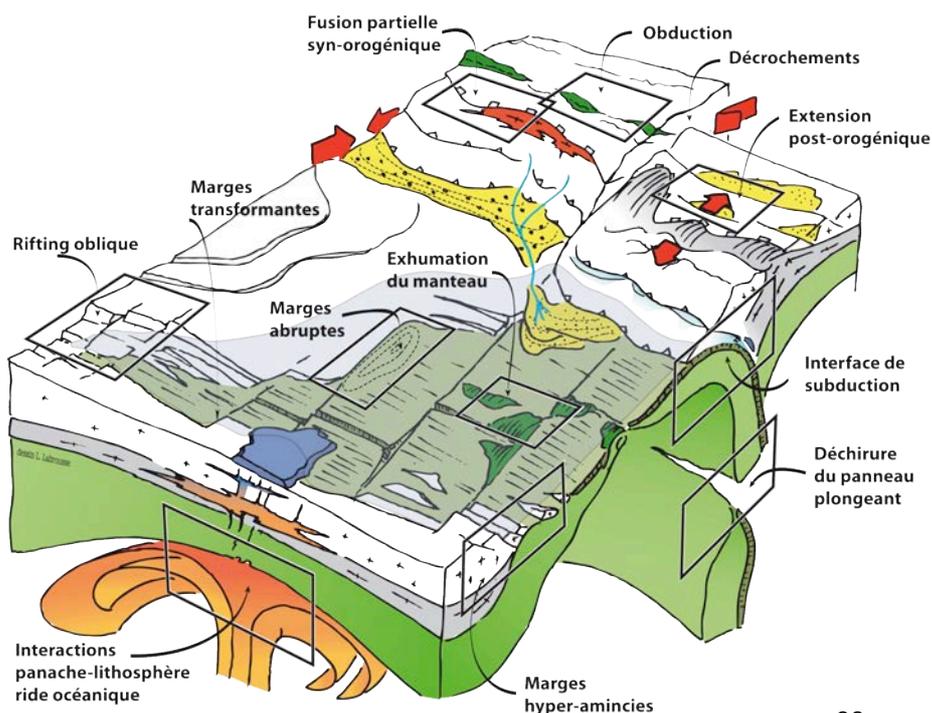
1. Composition de l'équipe

Chercheurs, enseignants-chercheurs et ingénieurs qui participeront à l'équipe lors du prochain quinquennal

Nom	Statut	Spécialités
d'ACREMONT Elia	MCF	Géologie Géophysique marine
AGARD Philippe	PR1 - IUF	Péto-Métamorphisme - Tectonique
BOSCHI Lapo	MCF- HDR	Sismologie
BUROV Evgueni	PR1	Rhéologie, Modélisation thermo-mécanique
DUBACQ Benoît	CR2	Métamorphisme-Thermodynamique
LABROUSSE Loïc	MCF- HDR	Tectonique
LE POURHIET Laetitia	MCF	Rhéologie, Modélisation thermo-mécanique
LEROY Sylvie	DR2- Resp. d'équipe	Géophysique Géologie marine
ROSENBERG Claudio	PR2	Tectonique
VERLAGUET Anne	MCF	Métamorphisme - Interactions Fluide-Roche
WOLF Sylvie	IR	Modélisation thermo-mécanique

2. Evolution prévisible des thématiques de recherche de l'équipe

La rhéologie et le comportement mécanique de la lithosphère suscitent toujours de nombreux débats et questions. Ils sont plus que jamais au centre de notre projet d'équipe, notamment grâce à l'ERC Rheolith (coPI : E. Burov). Le plus grand défi est d'élaborer une approche indépendante permettant une re-paramétrisation, la mise à l'échelle de données de laboratoire à l'échelle des temps géologiques et de relier des observations à court et à long terme. Il s'agit aujourd'hui de mieux contraindre la rhéologie lithosphérique en travaillant sur des objets naturels à différentes échelles et dans des contextes géodynamiques variés illustrés sur la Figure ci-contre.



1 - Les lithosphères en convergence : Subduction/obduction/collision

1.1 Processus physico-chimiques et couplages dans les zones de subduction

Bien que source de destructions majeures, la nature de l'interface des plaques en subduction demeure très largement méconnue. Quelques caractéristiques essentielles en sont l'existence (1) d'une zone sismogénique allant de 10 à 35-40 km de profondeur, zone de glissement intermittent et siège, à sa base, d'une probable percolation de fluides (ETS), (2) d'une éclogitisation et densification de la lithosphère plongeante par déshydratation progressive et sismique, responsable du slab pull et du transfert des fluides vers le manteau, (3) d'un coin de manteau hydraté, favorisant le découplage mécanique entre les deux plaques et alimentant le magmatisme d'arc. Mais les études actuelles, encore trop souvent disjointes, achoppent toujours sur les questions suivantes : quelle constitution lithologique pour cette interface, quelles dimensions, mélanges éventuels et à quelle échelle ? Quels y sont les trajets détaillés des roches ? Quels sont les mécanismes de déformation et l'échelle temporelle des couplages ? Quel lien précis entre déshydratation et sismicité ? Quels processus détachent les roches du panneau plongeant ? Quel est le rôle des fluides, les modalités des transferts, les flux vers les différentes parties du manteau et leur impact sur le recyclage des éléments ? La cible de ce projet est donc la nature physique et chimique de l'interface des plaques en subduction, pétrologique ET mécanique, avec pour objectif une résolution inédite de 0,5-1km, à travers une approche multi-scalaire thermobarométrique, géochimique et géodynamique d'objets fossiles (Alpes, Sistan) couplée à des modélisations numériques (rhéologies visco-élasto-plastique réalistes, changements de phases thermodynamiques, prédictions de sismicité, migration des fluides et prise en compte de la cinétique,...), s'appuyant sur une caractérisation sismique et thermique fine au travers de collaborations internationales (ILP Task Force IX, projet Européen ITN).

1.2 L'obduction, un phénomène géodynamique singulier ?

Ce processus permet la mise en place, apparemment anormale, de portions de lithosphère océanique dense (ophiolites) sur une lithosphère continentale. Comprendre et paramétrer l'obduction représente un enjeu scientifique important pour la compréhension de la rhéologie de la lithosphère. On peut, de manière caricaturale, opposer deux visions: dans l'une l'obduction constituerait un charriage d'ampleur extraordinaire (>200-500 km) avec des modalités mécaniques à part, dans l'autre elle ne serait qu'un avatar d'une subduction continentale. Le projet fédérateur O:NLAP (financé par l'ANR) et ses développements lient la modélisation (numérique et analogique) aux techniques pétrologiques, tectono-sédimentaires, géochronologiques, géochimiques et géophysiques sur deux ophiolites classiques bien préservées, celle d'Oman et celle de Nouvelle Calédonie (avec un volet de géophysique terre-mer sans précédent mis en œuvre avec des collègues allemands).

1.3 Collision continentale, exhumation et évolution de la largeur d'une chaîne.

Au cours de la collision continentale, les chaînes de montagnes sont les lieux de création et destruction de reliefs et d'importante exhumation associée à des changements de largeur de la chaîne. La modélisation analogique et numérique de ces processus montre que l'érosion exerce un contrôle de premier ordre sur ces paramètres. Un excellent laboratoire naturel pour répondre à ces questions, est représenté par les Alpes, où des variations latérales de largeur, du raccourcissement et de l'exhumation, permettent de vérifier si la variation d'un de ces paramètres est systématiquement associée à la variation des autres. Ces variations se font à l'échelle de moins de 100 km, le long de segments de la chaîne non interrompus par des accidents tectoniques ou topographiques importants. Le climat peut donc être ignoré comme cause potentielle de ces changements. A l'aide de bilans mettant en relation la quantité de raccourcissement avec celle d'exhumation, d'érosion, et la largeur de la chaîne, on étudiera les corrélations entre ces paramètres.

1.4 Collision continentale et modifications rhéologiques de la croûte.

L'anatexie crustale, typiquement observée dans les phases orogéniques tardives, est la transformation rhéologique la plus significative qui puisse se vérifier dans la croûte. A l'aide d'une étude expérimentale, nous étudierons la rhéologie de la croûte partiellement fondue et l'effet de la déformation sur les mouvements de 'melt'. L'effet de l'anisotropie mécanique des roches sera pris en compte pour la première fois.

2 - Les lithosphères en extension : marges continentales, exhumation du manteau, réactivations

Les résultats récents obtenus sur les marges continentales à partir des campagnes océanographiques, des forages profonds ou des études à terre, remettent en question certains concepts considérés comme établis. La découverte en pied de marge de domaines où le manteau continental est exhumé, où la croûte continentale est amincie à l'extrême sans failles apparentes, nécessite la conception d'un nouveau modèle de déformation. Quel

processus permet le dépôt sans déformation visible de sédiments lacustres ou marins sous une faible tranche d'eau dans les transitions océan-continent ? Quelle est l'implication du magmatisme au cours des différents stades de l'évolution d'une marge ? Quel est le rôle du manteau depuis les stades initiaux du rifting jusqu'à un stade évolué de l'histoire de la marge ? L'analyse fine des architectures sédimentaires permet de décrypter à différentes échelles de temps et d'espace, les interactions entre climat, érosion, sédimentation et dynamique des mouvements verticaux sur ces marges. Ces découvertes et questions requièrent la compréhension de la dynamique du manteau, de la lithosphère et de leurs interactions avec les processus de surface. Les zones distales des marges sont devenues le lieu privilégié de nouvelles études. Aux questions encore non résolues liées au fonctionnement des rifts, marges et dorsales (e.g. importance de la stratification rhéologique, héritage structural et structure thermique, rôle de la circulation des fluides), s'ajoute aujourd'hui celle de la dynamique du passage de l'extension continentale à l'accrétion océanique.

La genèse et le devenir des marges continentales peuvent être également abordés en comparant des stades plus ou moins avancés dans la formation et la déformation des bassins océaniques. Les principales questions concernant l'évolution des marges divergentes jusqu'à leur réactivation, sont : Quel est le comportement rhéologique de la lithosphère lors de la genèse de la marge, lors de sa réactivation et lors des transferts de masse ? Comment se réalise la réactivation des marges passives en contexte arrière-arc ou non ? Quelle est l'origine de la sismicité et des déformations actives/récentes en relation avec l'héritage structural ?

Les nombreuses données (géophysique marine, sismologique, structurale, sédimentologique) récoltées lors de l'ANR YOCMAL (Young Conjugate Margins Laboratory) et Actions Marges Afar/Aden vont permettre d'obtenir une image 3D de la structure profonde (manteau), intermédiaire (croûte), et superficielle (sédiments) du Golfe d'Aden et de la modéliser. Les ANR Rift2Ridge et SismoSerp permettront la caractérisation géophysique des roches du manteau exhumé et de contraindre la géodynamique de l'exhumation à l'axe de la dorsale Sud-Ouest Indienne Ultra-lente (campagne Sismo-smooth).

En Alboran, les données des campagnes MARLBORO-1+2 (INSU, Actions-Marges) et SARAS (Eurofleets), des programmes français TerMex et Actions Marges (Améditer) ainsi que celles des programmes nationaux espagnols Contouriber, Sagas et Européens Topomed, permettront d'avancer dans la compréhension des mécanismes de formation et déformation des domaines extensifs.

3 - Décrochements

Un des enjeux actuels de la tectonique des plaques est de comprendre la géométrie, la localisation et l'évolution spatiale et temporelle des frontières de plaques en fonction des conditions aux limites (cinématique des plaques) et de la rhéologie de la lithosphère (continentale ou océanique). Jusqu'à présent, les modèles mécaniques de la lithosphère se limitent à des coupes verticales (2D en déformation plane) à travers la Terre et se concentrent principalement sur les failles à rejet vertical (inverses et normales). Ces failles ont la particularité de jouer au travers de la stratification mécanique de la lithosphère, si bien que leur réponse visco-élastique intègre à la fois la réponse du manteau et celle de la croûte. A contrario, les systèmes de failles décrochants traversent la lithosphère et enregistrent son comportement mécanique dans son plan d'anisotropie mécanique. Leur comportement devrait donc être drastiquement différent selon que la lithosphère est constituée de deux couches résistantes (modèle «jelly sandwich») ou d'une seule (modèle «crème brûlée»). Les grands décrochements continentaux comme la faille de San Andreas en Californie, la faille nord Anatolienne en Turquie, les grands décrochements en Himalaya-Tibet ont fait l'objet de nombreuses études géologiques et géophysiques (datations, forages, sismique, géodésie). Celles ci mettent en évidence des matériaux de nature très variable juxtaposés par les déplacements cumulés sur ces grands systèmes, ce qui affecte le caractère permanent ou transitoire de ces grandes failles ? Les travaux parachevés en collaboration avec le TO (Caltech) ont confirmé à l'aide de modèle 2D qu'un lien existe entre l'activité sismique des grands décrochements et la géodynamique globale. D'autres travaux commencés dans le cadre d'un projet EMERGENCE-UPMC et de financements INSU ont rendu possible la modélisation numérique des failles décrochantes continentales en 3D à des échelles de temps variant du cycle sismique à celui des temps géologiques. Dans les deux cas, ces études ont permis d'établir de nouveaux modèles conceptuels permettant de faire le lien entre les échelles de temps. Ces modèles seront étendus et enrichis en s'attachant à mieux comprendre la formation et l'activité des marges transformantes grâce aux nouvelles données qui seront acquises dans les chantiers communs Haïti et Alboran/Maroc, d'une part et aux données industrielles sur les marges transformantes de l'Atlantique, d'autre part.

4 - Interactions Manteau-Lithosphère (IML)

Nous sommes motivés par le succès de nos travaux antérieurs qui portaient sur le problème de la réponse de la lithosphère continentale (en particulier, topographie dynamique «réaliste») aux sollicitations mantelliques profondes (e.g. panaches). Les propriétés rhéologiques visco-élasto-plastiques permettent aux plaques continentales et, en

partie, océaniques, de «moduler» la signature en surface (déformation, topographie, magmatisme) des phénomènes liés à la convection et aux panaches mantelliques. En se déformant, la lithosphère continentale introduit de petites longueurs d'onde (50-500 km) qui portent des informations caractéristiques de la structure thermo-rhéologique de la lithosphère, le sujet qui fait actuellement l'objet d'un débat très controversé. D'autre part, les déformations tectoniques en extension ou en compression, propres à la lithosphère, peuvent déstabiliser la frontière asthénosphère-lithosphère avec pour conséquence, le développement d'instabilités gravitaires de type RT ou délamination, l'érosion thermomécanique à la base de la lithosphère. Les IML entraînent des mouvements rapides de la surface qui ne peuvent être expliqués par les modèles de la tectonique des plaques au sens propre. Afin de se rapprocher du comportement géodynamique réaliste de la lithosphère continentale, et mettre en évidence les conséquences des IML et IPL (interactions panache-lithosphère) à l'échelle tectonique, nous proposons de développer, en 3D, des modèles numériques thermomécanique issus de l'étude du comportement mécanique de la lithosphère, i.e., prenant en compte (1) sa structure verticale et horizontale, (2) sa rhéologie visco-élasto-plastique, (3) des conditions aux limites réalistes telles que la surface libre, (4) fusion partielle et changements de phases thermodynamiques. Ainsi, nous étudierons la réponse de la lithosphère (topographie, déformation interne et en surface, magmatisme) dans différents contextes d'IML : (1) mise en place de panaches mantelliques ; (2) déstabilisations gravitaires des cratons et des frontières intracontinentales, durant la formation et l'évolution des marges passives comme en contexte de subduction et collision intracontinentale ; (3) Interaction entre la déformation tectonique (e.g. flambage, flexure) et les IML/IPL. Nos études 2D ont déjà montrés que les IML, peuvent par exemple, expliquer l'absence apparente de la topographie dynamique dans les zones présumées d'IPL ou, dans certains cas, la formation polyphasée et périodique des bassins sédimentaires et de rifts, événements magmatiques y compris. A partir de ces modèles, nous pourrons également construire des modèles de tomographie sismique directement comparables aux observations, réalisées notamment par notre équipe. Ces IML sont, en outre, reliées aux crises métallogéniques Archéennes en Afrique du Nord et à la maturation des hydrocarbures dans les marges profondes.

3. Les approches

Pour le transfert d'échelle, différentes approches sont nécessaires et seront mises en œuvre. Ces différents outils constituent le point fort de notre équipe : sa pluridisciplinarité, le lien Terre-Mer et la modélisation.

Approche terrain

Les compétences réunies par les géologues de l'équipe LSD permettent un transfert d'échelle complet de celle de la résolution des outils géophysiques à celle de la taille des grains des roches témoignant des mécanismes intimes de leur déformation. A l'heure où les outils de la géophysique et de la modélisation convergent vers une résolution kilométrique (en tomographie sismique ou dans les modèles thermo-mécaniques utilisés et développés au sein de LSD), les études de terrain génèrent des données cruciales : carter les champs de déformation finie et instantanée à l'échelle d'une région (le Mont Viso, les Gneiss de l'Ouest) donne un observable de validation des modèles thermo-mécaniques en les comparant à des champs de déformation synthétiques. Illustrer les relations entre déformation et réactions métamorphiques (fusion partielle, éclogitisation, serpentinitisation/désertinitisation) à l'échelle de l'affleurement puis de l'échantillon permet de mettre en évidence des mécanismes localisant capables d'éloigner le comportement réel des roches de celui prédit par les expériences et encore utilisé dans les modèles thermo-mécaniques. La prise en compte des fluides, le traçage de leur parcours et leur relation avec la déformation (l'eau dans le socle Alpin, les jus de fusion dans les migmatites) est un autre défi de la géologie sur le terrain.

Enfin, notre approche de terrain, forte au sein de l'équipe, est le pendant nécessaire de la géophysique marine, pour assurer le lien entre structures on shore et off shore, mais aussi corrélérer faciès sismiques et unités tectono-sédimentaires, avec un regard en permanence renouvelé par les retours conceptuels de la modélisation numérique et de la géophysique à haute résolution.

Approche pétro-géochimique

Les analyses pétro-géochimiques sont un prolongement nécessaire de l'étude de terrain, afin de quantifier (chemins P-T, transfert de matière, composition des roches / fluides) et préciser à micro-échelle les processus suggérés par les observations de terrain. Les analyses pétrographiques permettent, entre autres, de retracer les chemins P-T-t suivis par les roches et ainsi leurs mécanismes d'exhumation : caractérisation pétrographique des paragenèses, analyse chimique des minéraux (microsonde électronique et MEB), spectroscopie RAMAN, thermobarométrie (multi-équilibres et pseudosections), permettent de calculer des chemins P-T-t pouvant être comparés aux chemins synthétiques obtenus par modélisation thermomécanique.

Les outils géochimiques permettent aussi la caractérisation des fluides présents (composition, localisation, échelle de circulation, degré d'interaction fluide-roche) : analyses chimiques (majeurs et traces) des veines versus roche encaissante, analyse des inclusions fluides (microthermométrie, RAMAN, ICP-MS), isotopie des minéraux des veines ; le couplage de ces différents outils retrace l'évolution des compositions du/des fluide(s) au cours de l'enfouissement/exhumation de la roche, ainsi que les sources de fluide (externes ou internes) ou l'évolution spatio-temporelle des réseaux de circulation. Ces traces "indirectes" de la composition des fluides sont couplées à la modélisation thermochimique de composition des fluides (i.e., SUPCRT92) et à l'expérimentation sur les interactions fluide-minéraux.

Comprendre les relations entre fluides et déformation, via les recristallisations minérales et le transfert de matière notamment, est un enjeu majeur. Un de nos objectifs est notamment d'évaluer la distance caractéristique d'équilibre fluide-minéraux dans les zones déformées à l'aide de cartes P-T-t-déformation-fluide à l'échelle de la lame mince (cartographies chimiques couplées à une thermobarométrie haute-résolution des paragenèses des structures de déformation successives - i.e., phyllosilicates dans les schistosités et bandes de cisaillement successives).

Approche Géophysique - Imagerie

Nos outils et compétences concernent la mise en œuvre combinée de méthodes géophysiques telles que la bathymétrie, la réflectivité, la gravimétrie, le magnétisme, la sismique réflexion moyenne à très haute résolution, complétées par la sismique multitrace et réfraction et la tomographie sismique (body-wave, bruit de fond, RF, SKS, Pn). Mis en œuvre à la fois à terre et en mer, ils permettent d'étudier les systèmes dans leur ensemble, avec des outils complémentaires en ce qui concerne l'échelle d'investigation. Sur les différents chantiers, une base de données SIG (ArcGis) et d'interprétation sismique (Kingdom Suite) sera enrichie par les lignes de sismique réflexion industrielles et académiques à différentes échelles d'investigations. L'originalité de notre démarche consiste en l'acquisition de données en zone côtière. Les projets en cours permettent aux géologues terrestres et marins de travailler ensemble. Forts de notre expérience acquise lors de nombreuses campagnes en mer côtières et hauturières dans le golfe d'Aden et au large du Maroc, nous souhaitons effectuer des développements méthodologiques nécessaires à l'imagerie sismique de haute résolution terrestre en collaboration avec le laboratoire Sisyphe (UPMC). Ces derniers sont un défi compte tenu des profondeurs et des résolutions envisagées (<500 m) et permettront notamment de mettre en œuvre des techniques avancées offrant un accès à de hautes résolutions. Des déploiements d'OBS 3D et 2D (haute résolution) sont prévus afin d'obtenir une contrainte géophysique de l'exhumation du manteau à des degrés de serpentinisation variables (Sismo-smooth cruise, programmable fin 2013).

L'équipe va renforcer l'outil sismologique avec l'analyse du **bruit de fond sismique** qui nous permettra d'observer la propagation des ondes de surface en utilisant le signal ambiant enregistré sans interruption par des sismomètres. Notre travail d'imagerie bruit-de-fond va impliquer: (i) une meilleure compréhension des propriétés physiques du bruit de fond; (ii) l'application des nouvelles méthodes sur des données assemblées soit par notre équipe (Afar/Aden; Caraïbes; Méditerranée occidentale), soit ailleurs (e.g. AlpArray; RESIF). L'application de ces méthodes sur des déploiements denses va nous accorder une couverture azimutale très uniforme, donc suffisante pour contraindre l'anisotropie sismique. A travers la physique des roches, l'anisotropie mesurée à cette échelle est un marqueur direct du flux mantellique, en particulier dans la zone à la limite lithosphère-asthénosphère.

Approche modélisation

L'équipe de modélisation numérique thermo-mécanique de phénomènes géologiques et tecto-géodynamiques au sein de LSD est une des équipes leader au niveau national et international dans le domaine de la modélisation de la lithosphère et de ses interactions avec le manteau supérieur. L'équipe est dotée de capacités de calcul parallèle assez importantes (un cluster de 17 noeuds quadri-cœurs (68 cores), supercalculateur à mémoire partagée de 300 cœurs) et participe à l'Institut du Calcul et de la Simulation et au Labex CALSIMLAB (Labex pour la modélisation et la simulation scientifiques en recherche) de l'UPMC. Jusqu'à présent, le code visco-élasto-plastique développé localement, Flamar, était le principal outil pour la modélisation en 2D (Flamar est thermodynamiquement couplé, prend en compte la surface libre, la migration de fluides et les processus de surface) alors que les modèles 3D publiés ont été réalisés avec une version modifiée de Gale. Le code Flamar reste d'actualité avec sa parallélisation en cours par S. Wolf. Pour les aspects 3D, pTatin, un code d'éléments finis 2/3D dont la première phase de développement vient de s'achever continuera d'être développé dans un partenariat entre D. May/ETHz et L. Le Pourhiet. Il est prévu de délivrer des versions sphériques et de coupler ce nouveau code avec les processus de surface et la migration de fluides. D'autre part, un partenariat débute avec T. Gerya (ETHz) et E. Burov pour l'utilisation et le développement du code 3D multigrille, basé sur les différences finies, El3vis, qui est aussi thermo-dynamiquement couplé et prend en compte la migration de fluides et la fusion partielle et qui permet d'accéder à de très hautes résolutions spatiales (e.g. 2000x2000x1000) à ce jour jamais atteintes dans des modèles 3D. Les modèles thermomécaniques multi-physiques

sont un outil majeur dans l'étude de la rhéologie de la lithosphère à différentes échelles spatiales et temporelles. Néanmoins, la modélisation ne s'arrête pas aux modèles thermo-mécaniques. Des codes de modélisation thermodynamique tels que THERMOCALC, Theriak-Domino, PerpleX ou SUPCRT92 ou de déformation d'agrégats (plateforme de micro-simulation ELLE) font aussi partie des outils quantitatifs utilisés maintenant en routine dans notre équipe.

4. Les 3 chantiers fédérateurs de l'équipe LSD (2014-2018)

ALBORAN - MAROC :

DE L'OUVERTURE A LA REACTIVATION D'UN BASSIN EN CONTEXTE ARRIERE-ARC: ETUDE INTEGREE TERRE-MER

L'originalité des marges du Bassin d'Alboran par rapport aux marges passives dites « typiques » tient (i) à leurs localisations dans un espace très confiné ce qui entraîne une obliquité du rifting et un avortement du rift, donc une absence d'océanisation, des rotations de blocs, un fort partitionnement de la déformation avec de grands systèmes décrochants, une inversion précoce du système extensif en système compressif ; (ii) leurs formations qui s'effectuent dans un continuum de déformation depuis leurs ouvertures jusqu'à leurs réactivations en extension, compression ou en décrochement. La Mer d'Alboran est donc un chantier clé pour étudier les mécanismes de réactivations, d'exhumation, d'héritage structural, d'évolution de frontière de plaques et d'aléas. Des questions majeures restent en suspens concernant l'origine et la dynamique de l'extension ayant formée le bassin Alboran en contexte de collision. Le bassin profond Ouest Alboran, avec plus de 10 km de sédiments, ne montre aucun signe de failles normales majeures pouvant être responsables d'une telle subsidence. Le domaine Est Alboran est caractérisé par des systèmes tectoniques actifs transpressif et transtensif. Un haut structural constitué de socle métamorphique sépare ces deux domaines, il est pour certains interprété comme un « core complex ». Comment expliquer la formation de telles structures ? Quel est l'impact des processus profonds (retrait du slab, effondrement gravitaire, délamination/ablation de croûte inférieure) et des processus crustaux (exhumation, détachements, décrochements) sur la formation, déformation du bassin sédimentaire ?

La région d'Al Hoceima (Maroc) présente une activité sismique et gravitaire importante avec des séismes destructeurs en 1994 et 2004. La précision à terre et en mer de la géométrie et nature des structures potentiellement actives susceptibles de générer des séismes destructeurs et donc des tsunamis, restent à faire. Ce projet permettra d'établir le lien terre-mer fondamental à la compréhension globale du système de failles actives et d'avancer dans la caractérisation, encore incertaine dans cette zone, de la frontière de plaque. L'approche ainsi proposée pourra servir de « proxy » pour les zones à fort aléa sismique, gravitaire ou de tsunami. En outre, une étude combinée structurale/géochronologique des failles accommodant les grands mouvements extensifs Miocènes (détachement de Beni Bousera) nous permettra de mieux définir le moment et les conditions de l'initiation des mouvements extensifs. L'obtention de grands transects terre-mer à l'échelle crustale couplés à la réalisation de modèles thermomécaniques 3D à l'échelle du bassin d'Alboran et de la méditerranée occidentale est l'un des objectifs de ce projet qui permettra de caractériser l'impact de l'héritage structural sur le fonctionnement pérenne des systèmes décrochants en mer d'Alboran et de tester les différentes hypothèses paléogéographiques et la dynamique du domaine Alboran (roll-back vs délamination) à l'aide de modèles 3D à l'échelle du manteau supérieur. Ces modèles seront comparés aux nouvelles données acquises à Terre et en Mer ainsi qu'aux données sismologiques existantes.

Ce projet implique tous les chercheurs de l'équipe et est également trans-équipe avec DESIR et BASSIN.

HAÏTI :

DYNAMIQUE MULTI-ECHELLE D'UNE FRONTIERE TRANSFORMANTE EN CONTEXTE DE COLLISION OBLIQUE

S'agit-il d'une faille unique, ou d'un réseau de failles parallèles pouvant alors jouer alternativement ou simultanément ("zone" décrochante) ? Quelles sont les évolutions latérales de ces systèmes et leurs connexions avec les systèmes compressifs ou transtensifs ? Quel est le découplage entre la déformation en surface et la déformation en profondeur (croûte/manteau) ? Quel est le rôle de l'héritage structural sur les déformations actuelles (anciennes marges continentales étirées composées de plusieurs domaines crustaux) ? *Pourquoi aborder ces questions sur la frontière Nord Caraïbe et notamment dans la région d'Haïti ?*

L'ensemble de plaques lithosphériques de la région Nord Caraïbe forme une structure instable et complexe : le système transpressif n'a pas atteint un stade de raccourcissement ultime et il est encadré par deux bordures transformantes au Nord et au Sud. Les grands décrochements sont encore bien individualisés par rapport au prisme d'accrétion tectonique. Le système transformant dans son ensemble reste peu affecté par la collision, ce qui en fait un objet d'étude exceptionnellement lisible. Dans la région d'Haïti, les relations entre les décrochements et la construction progressive du prisme peuvent être caractérisées à la fois en mer et à terre. La faible épaisseur

sédimentaire (quelques km seulement) permettra d'imager et de comprendre les relations entre les processus tectoniques de type "thin-skin" dans la partie supérieure et de type "thick-skin" au niveau du socle. La bordure transformante Nord Caraïbe met en jeu des processus de transpression impliquant **au Nord**, les marges continentales passives d'Amérique du Nord bordant l'Atlantique central, et la partie orientale du Golfe du Mexique (Ouest-Floride) et **au Sud**, les blocs continentaux et le plateau océanique Caraïbe d'âge Albien à Campanien (Poster). Le long des deux bordures décrochantes, le défi est de contraindre leurs évolutions spatio-temporelles et d'évaluer leur pérennité en tant que discontinuité lithosphérique. Les deux zones de failles sont également accessibles à terre, ce qui permettra, outre le changement d'échelle d'observation, de contraindre la chronologie de la propagation de la déformation.

Une campagne océanographique est programmée en Décembre-Janvier 2013, des campagnes de terrain (tectonique, métamorphisme HP/BT, chenal de subduction de Cuba-Hispaniola) seront réalisées fin 2013-2014, une acquisition de sismique réfraction terre-mer et un profil sismologique haute résolution sont prévus en 2014, ainsi qu'un volet de modélisation 3D.

Ce projet rassemblera tous les chercheurs de l'équipe et également certains des équipes DESIR et BASSIN.

ARCTIQUE :

RECONSTITUTION PALEOGEOGRAPHIQUE ET GEODYNAMIQUE DES BASSINS ARCTIQUES

2011-2015 : Groupe Recherche Industrie UPMC/TOTAL : Cadre géodynamique et cibles régionales

Deux régions ont été ciblées, toutes deux d'intérêt à la fois fondamental et pétrolier : la mer de Laptev (Sibérie orientale) dans le prolongement de la ride ultra-lente de Gakkel, et la chaîne des Brooks (Alaska, Yukon) et de la mer de Beaufort. **Sur la mer de Laptev**, une première mission de terrain dans les îles de Nouvelle Sibérie a concrétisé la collaboration avec les services géologiques allemand et russe. Nos efforts se concentrent sur les effets de l'héritage structural sur le développement du rift Laptev. Les grains structuraux des chaînes Taimyr et Verkhoyansk avoisinantes ont en effet pré-structuré la lithosphère continentale, maintenant affectée par une extension ultra-lente. **Dans la chaîne des Brooks**, une reconstitution complète de l'histoire thermique polyphasée du prisme lithosphérique est envisagée pour in fine (1) modéliser l'évolution thermique des roches mères trias (Formation Shublik) et (2) évaluer les interactions entre climat et orogénèse aux hautes latitudes. Un projet en collaboration avec les services géologiques d'Alaska et du Yukon vise à évaluer cette histoire thermique par une campagne de datations U-Th/He (thèse 1 avec F. Mouthereau, équipe DESIR) et une étude des témoins possibles de phases d'extension/exhumation révélatrices de couplages/découplages entre le bassin amérasien et la subduction pacifique (thèse 2 au sein de LSD). Le prolongement des données terrestres vers la mer de Beaufort est étayé par des données de sismiques industrielles remarquables, qui imagent entre autre la marge abrupte de l'île de Banks. Les traces de possibles décrochements le long de cette marge sont aussi à chercher à terre à la terminaison orientale des Brooks au Yukon.

2016-2020 : Acquisition de données géophysiques nouvelles

L'idée à moyen terme derrière le GRI ZPA est de définir une cible régionale d'intérêt géodynamique crucial pour décider de l'acquisition de données géophysiques lourdes, comme le GRI Chine du Sud l'a récemment réalisé (PI M. Pubellier). Les géophysiciens de l'équipe LSD seront donc impliqués dans une phase 1 d'acquisition envisagée à l'horizon 2015/2016.

Ce projet impliquera tous les chercheurs de l'équipe. Il est déjà actuellement trans-équipe avec l'équipe DESIR et BASSIN.

Financements Acquis ou Prévus :

ERC Rheolith 2011-2017 (Burov) - IUF (Agard)
Groupe Recherche Industrie (GRI Arctique ; Labrousse)
Actions Marges Phase 2 (d'Acremont, Leroy, Le Pourhiet)
Consortium international « Transformantes » (Leroy)
Convention Marges Sud Mer Rouge et Ouest Aden (Leroy)
Coopération Franco-Marocaine CNRS-CNRST (d'Acremont)
Eurofleets SARAS (d'Acremont)

ERC starting Grant (Boschi)
ITN (Agard)
ANR SismoSerp (Leroy)
ANR « Trans-Haiti » (Leroy)
ANR Comsurf (Burov - troisième tentative en 2013)

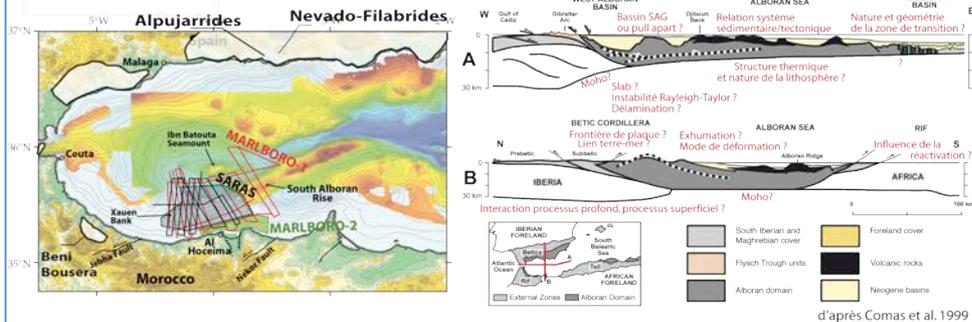
Collaborations :

Nationales : Lucazeau, Cannat, Jaupart, Diament, Singh, Escartin, Occhipinti, Montagner, Cartigny / IPGP ; Calais, Pubellier, Chopin/ENS ; Denèle/ Toulouse ; Jolivet, Raimbourg, Augier/ Univ. Orléans ; L. Husson/ Nantes ; S. Guillot, F. Brunet, O. Vidal/ Univ. Grenoble ; G. Manatschal, D. Sauter, J. Autin, C. Doubre/ Strasbourg ; R. Pik/ Nancy ; Geoffroy, Perrot, Le Roy, Gutscher, Rabineau/ Brest ; Razin/ Bordeaux III ; Zaragosi, Mulder/Bordeaux I ; Migeon, Mercier de Lépinay, L. Stehly / GeoAzur ; Monié/Montpellier ; Robin, Guillocheau, Brun, Yamato/Rennes ; Guennoc, Bitri, Thion/BRGM, Klingelhoffer / Ifremer.

PROJETS FEDERATEURS de l'EQUIPE LSD - 2014-2018

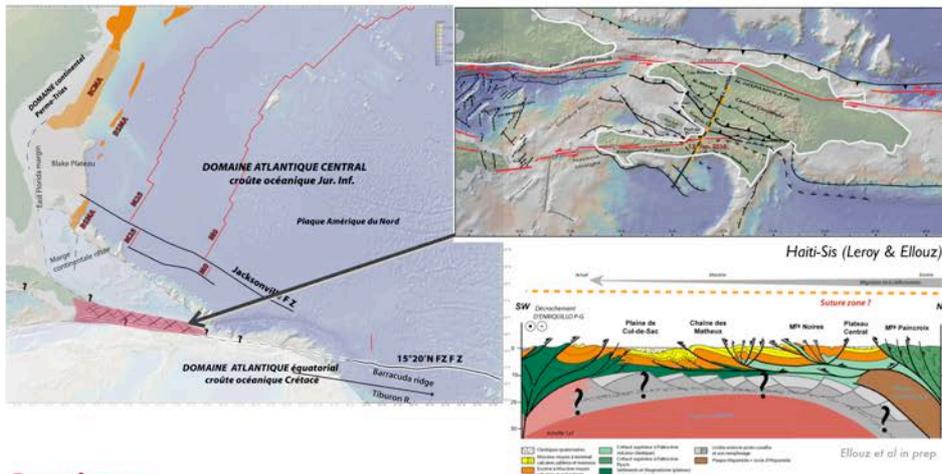
Alboran-Maroc

DE L'OUVERTURE A LA REACTIVATION D'UN BASSIN EN CONTEXTE ARRIERE-ARC : Etude intégrée terre-mer



Haïti

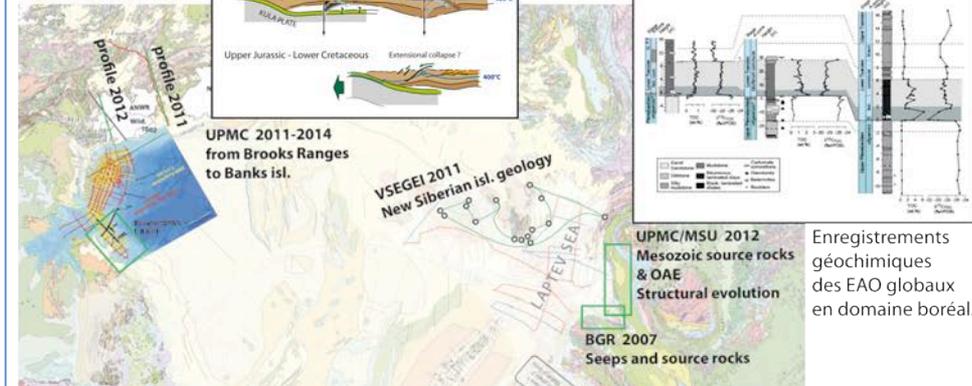
DYNAMIQUE MULTI-ECHELLE D'UNE FRONTIERE TRANSFORMANTE DANS UN CONTEXTE DE COLLISION OBLIQUE



Arctique

RECONSTITUTION PALEO GEOGRAPHIQUE ET GEODYNAMIQUE DES BASSINS ARCTIQUES

Histoire thermique polyphasée des Brooks Ranges du North Slope aux zones internes



Internationales : C. Faccenna / Univ. Roma Tre; G. Soldati, A. Morelli / INGV Roma/Bologna M. Handy / Univ. Berlin; C. Tirel, Lebedev / Dublin Institute for Advanced Studies; L. Royden / MIT Boston ; T. Becker, M. Miller / USC Los Angeles ; C. Ebinger / U. Rochester; Stuart / Leeds ; Keir / Southampton ; Watts / Oxford ; T. Gerya ; E. Kissling, D. Giardini, T. Nissen-Meyer, D. May / ETH Zurich; S. Cloetingh R. Govers, W. Spakman et D. Sokoutis / Univ. Utrecht ; Kostopoulos / Univ. Athènes ; Huisman / Univ. Bergen ; P. Llanes et J.L. Granja / Univ. Complutense Madrid, Hayman, Lavier/Utig ; Shillington, Buck, G. Ekstrom, Hough, Cormier / Lamont-Doherty Earth Observatory New York ; A. Forte / Université du Québec a Montreal ; Loudon, Nedimovic/Dalhousie ; Univ. Sana'a ; Univ. Sultan Qabous ; A. Ammar / Univ. Mohammed V-Agdal ; A. Tahayt / CNRST, Rabat ; M. El Moumni / Univ. Essaadi Larache; G. Ercilla, B. Alonso, F. Estrada / CSIC Barcelone; M. Comas, J. Galindo Zaldívar / Univ. Granada CSIC ; J.T. Vazquez/ IEO Malaga Saleeby et M. Gurnis/ Caltech.

L'équipe LSD est partie prenante des plateformes 'Sismique-Imagerie-SIG' ; 'Modélisation-Calculs' et 'Péto-géochimie' de l'ISTEP.

Prospective de l'équipe « Pétrologie Géochimie Minéralogie magmatiques » (PGM²)

1. Composition de l'équipe

<i>Enseignants Chercheurs</i>	Statut	Age	Thématiques
BALCONE_BOISSARD Hélène	MC	31	Magmatologie-Volcanologie
D'ARCO Philippe	PRCE	55	Modélisation matériaux-Minéralogie-Pétrologie endogène
HONTHAAS Christian	MC	47	Péto-géochimie magmatique
JAMBON Albert	PRCE	62	Planétologie
LEJEUNE Anne-Marie	MC	45	Propriétés des magmas - Volcanologie
MARTIN Erwan	MC	32	Magmatologie - Planétologie - Volcanologie
NOEL Yves	MC	38	Modélisation matériaux-Minéralogie
PASCAL Marie-Lola	CR1	59	Minéralogie-Pétrologie endogène - Thermodynamique
SANLOUP Chrystelle	MC	39	Pétrologie Expérimentale
VILLEMANT Benoît (<i>responsable</i>)	PR1	57	Géochimie-Magmatologie- Volcanologie
WAGNER-RAFFIN Christiane	MC	60	Minéralogie - Pétrologie endogène - Géochimie
<i>Ingénieurs, Techniciens</i>			
BOUDOUMA Omar	IGR		Responsable MEB (Pole 3 MEN)
CARON Benoît	IGE		Responsable ICP-MS (Pole 3 GI)
BADIA Dominique	IGE		Responsable préparation et analyses Météorites
RAGU Alain	IGE		Caractérisation des matériaux naturels
DELAIRIS Eric	T		Litholamellage
<i>Personnel Administratif</i>			
DERLY Sylvie	AdjA		Gestion actuelle équipes PGV et MMM
DOLLIN Gitane	AdjA		Gestion administrative

Collaborateurs bénévoles : Michel Fonteilles, Colette Derré, Bernard Déruelle

2. Stratégie de l'équipe

L'équipe de recherche proposée rassemble des enseignants chercheurs et ingénieurs issus de trois structures antérieures différentes (équipe MMM-ISTeP, équipe PGV-ISTeP, équipe Volcanologie-IPGP). Le précédent quadriennal a constitué une première étape de l'intégration de très nombreuses composantes de Sciences de la Terre de l'UPMC dans une seule UMR (ISTeP). La réunion des deux équipes MMM et PGV de l'ISTeP est une nouvelle étape de cette intégration en un pôle unique Pétrologie et Géochimie des Systèmes Magmatiques et de leurs matériaux. Ces structures ont évolué ces dernières années (5 départs, dont 2 jeunes chercheurs MCF vers d'autres universités - Orléans et P7 - et 3 départs à la retraite).

La nouvelle équipe est composée de 11 enseignants chercheurs, 5 ingénieurs et techniciens et 2 agents administratifs. Une MC (C. Sanloup) est actuellement titulaire d'une « ERC starting grant » et en détachement jusqu'en 2014 à Edimbourg (UK).

Les effectifs de cette équipe évolueront fortement au cours du prochain quinquennal. La répartition des âges des enseignants-chercheurs (voir tableau ci-dessus) fait apparaître une forte disparité entre les corps A (tous ≥ 55 ans) et les corps B (très majoritairement < 45 ans). De plus cette situation évoluera rapidement car 4 enseignants-chercheurs, majoritairement de rang A, partiront probablement en retraite d'ici la fin du quinquennal.

Il s'agit donc de créer une structure qui évoluera au cours des années à venir. Nous proposons ici un projet qui met l'accent sur les points communs fédérateurs susceptibles de faire émerger une perspective scientifique originale et cohérente au cours des années à venir.

Le dynamisme et la pérennisation de cette structure ne pourra donc être réalisée que si elle est progressivement renforcée par d'une part l'obtention d'HDR par des jeunes chercheurs de l'équipe et au moins un recrutement corps A à court terme afin de prendre, probablement dès le mi-parcours, la direction de la nouvelle équipe.

3. Thématiques de recherche

Les thématiques de recherche de la future équipe seront développées sur la base des thématiques actuelles des différentes composantes qui vont de la différenciation des corps planétaires aux styles éruptifs et des minéraux aux provinces magmatiques. Les activités futures de la nouvelle équipe se structurent selon 4 axes principaux allant de la problématique générale aux développements analytiques:

3.1 Problématique générale : processus pétro-géochimiques et équilibres de phases

L'objet principal de la pétro-géochimie est de caractériser les processus pétrogénétiques enregistrés dans des échantillons naturels, à partir des compositions des phases (minéraux, verres, fluides) et de l'observation directe d'éventuelles réactions. Les conditions physico-chimiques de ces processus sont déterminées à l'aide de la modélisation et de l'expérimentation, sur les équilibres des phases et leurs propriétés physiques et thermodynamiques. Ces processus sont les causes des mécanismes de différenciation au sens large (différenciation liquide/solide- fusion, cristallisation- fluide/solide ou liquide -dégazage, interactions fluides-encaissant ou fluides magmas, solide/solide etc.) qui sont décrits par l'étude des évolutions géochimiques (majeurs, traces), minéralogiques et texturales de systèmes géologiques variés : par exemple météorites et différenciation planétaire, produits volcaniques et mécanismes de dégazage, séries magmatiques et nature des sources mantelliques et mécanismes de différenciation.

Cette démarche, fédératrice de toutes les activités des chercheurs de l'équipe, concerne donc principalement le magmatisme :

- La différenciation planétaire et magmatique (équilibres silicates-métaux, équilibres de phases minérales en particulier mantelliques (hautes P et T) et minéraux-liquides)
- Interactions entre magmas et encaissant (liquides-minéraux-fluides) aux niveaux mantellique et crustaux (métasomatisme, contamination, métamorphisme de contact et anatexie...)
- Comportement de la phase volatile dans les magmas et interactions avec l'environnement - application aux processus éruptifs et aux émissions de gaz volcaniques dans l'atmosphère
- Etude analytique et expérimentale de paramètres physiques mis en jeu dans les processus magmatiques : cristallinité, viscosité, diffusion... Le choix des paramètres étudiés dépend des processus fondamentaux mis en jeu dans les systèmes étudiés : par exemple évolution de la viscosité et micro-cristallinité au cours d'un processus éruptif
- Mesure expérimentale des propriétés physiques des magmas in situ à haute pression (densité, structure, viscosité), c'est-à-dire dans leurs conditions de genèse et de migration.
- Compréhension des structures minérales et de leurs domaines de stabilité (modèles).

3.2 Développement des thèmes et chantiers en cours

- Evolution géochimiques du manteau supérieur continental (métasomatisme) : xénolithes provenant de Chine, du Massif Central Français, Afrique du Sud.
- Caractérisation (majeurs, traces) et évolution des sources magmatiques et en particulier des éléments volatils: étude des produits volcaniques et tephrologie (reconstruction de l'évolution temporelle des magmas par la tephro-stratigraphie). Chantiers : Italie, Petites Antilles, Massif Central Français.
- Mécanismes de différenciation magmatique : de l'évolution d'un réservoir magmatique à la formation de la croûte continentale : volcanisme de l'Indonésie, du Chili, de l'Italie...
- Styles éruptifs, évolutions des caractéristiques pré-éruptives (volcanisme italien, Petites Antilles, Massif Central Français, Vanuatu)
- Influence des interactions entre les liquides magmatiques et les épontes carbonatées sur ces caractéristiques pré-éruptives dans ces systèmes (Vésuve)
- Relation entre magmatisme et métamorphisme de haut degré (Pyrénées-Orientales)

- La différenciation planétaire : chondrites et achondrites (compositions chimiques et minéralogiques, équilibres de phases, réactions métamorphiques, halogènes, radioactivités éteintes...).
- Comprendre le rôle joué par les magmas en profondeur (i.e. à haute pression) sur la dynamique terrestre et leur rôle dans le transfert des éléments entre différents réservoirs planétaires, depuis le stade de l'océan magmatique jusqu'à l'actuel (approche pétrologie expérimentale).

3.3. Prospective à court et moyen terme

Deux exemples caractéristiques de thématiques internes fédératrices qui seront développées dans cette nouvelle équipe sont indiqués brièvement avec leurs différents aspects et les chercheurs et ingénieurs directement impliqués dans ces travaux (voir fiches individuelles).

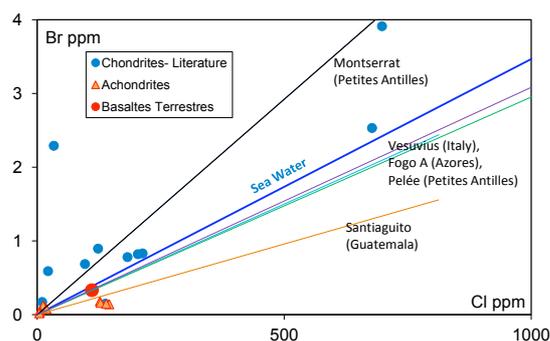
3.3.1 L'étude du comportement des halogènes dans les systèmes magmatiques des sources mantéliques au dégazage atmosphérique.

Les halogènes sont des éléments qui sont d'excellents traceurs de l'évolution de la phase volatile (et en particulier de l'eau) aussi bien au niveau de leur stockage mantélique (C. Sanloup et thèse I-Xe -direction de C. Sanloup et H. Bureau de l'IMPMC) que des processus et de transferts de fluides mantéliques (métasomatose mantélique, C. Wagner, M.L. Pascal, dégazage de la Terre primitive, C. Sanloup) et crustaux (lors de la subduction en particulier, arcs volcaniques, B. Villemant, H. Balcone-Boissard, B. Caron, E. Martin, C. Honthaas), et des mécanismes de dégazage lors des processus éruptifs (dynamique éruptive aux Antilles et au Vésuve, H. Balcone-Boissard, B. Villemant) et les transferts atmosphériques (E. Martin). Les mesures de composition de ces traceurs dans les matériaux solides nécessitent le développement de techniques d'analyse ponctuelle (micro-sonde électronique, F, Cl amphiboles et micas mantéliques - C. Wagner, verres volcaniques -H. Balcone-Boissard, B. Caron, B. Villemant), et par voie destructive sur de très faibles quantités de matériaux solides (F, Cl, Br, I -voir ci-dessous- B. Caron, B. Villemant). La détermination du comportement de ces éléments nécessite également des développements expérimentaux (mesures de coefficients de partage solide/liquide, C. Sanloup, A.M. Lejeune) et analytiques (distribution des halogènes dans les matériaux hétérogènes -par exemple météorites- O. Boudouma, A. Jambon). Des développements de modèles de phases minérales halogénées (minéraux mantéliques) pourront être éventuellement développés (Y. Noël, P. D'Arco). Des analyses systématiques de rapports d'halogènes dans les produits volcaniques de différents contextes d'arc (Antilles, Italie, Indonésie... B. Caron, C. Honthaas, B. Villemant) permettront de caractériser ces sources et développer des modèles d'évolution profonde de la phase volatile dans ces sources mantéliques complexes. De même l'investigation systématique de la composition en halogènes dans les météorites (en particulier en Br et I ce qui n'a jamais été réalisé; E. martin, A. Jambon, B. Villemant) permettra, en association avec les données expérimentales (en particulier I/Xe, C. Sanloup) de proposer des modèles d'évolution du dégazage dans les corps planétaires primitifs. Enfin, en collaboration avec le LATMOS, des modèles d'impact atmosphérique des halogènes (en particulier Br, destructeur d'ozone) seront développés (E. martin).



Figures: (Right) Cl/Br ratios in magmas from different volcanic settings (Volcanic Arcs, Hot Spot - regression lines- and MORB - red dot-) comparison with meteorites (Chondrites and Achondrites) and Sea Water compositions. Very few good quality data exist for these elements, but existing ones suggest that large Cl-Br fractionations occur in subduction zones, likely in relation with subducted fluids transfers. In addition chondrites seem to have distinct signatures from most terrestrial material (including SW).

(Left) Pyrohydrolysis apparatus in development in the laboratory for high precision halogen measurements in low material amounts (~10 mg).



3.3.2 Les phénomènes d'immiscibilité et leurs conséquences pétrologiques et géochimiques

Les phénomènes d'immiscibilité qui s'observent dans une phase donnée (liquide, fluide ou solide) découlent des propriétés structurales et thermodynamiques de cette phase, dont l'étude relève de la microanalyse, de la spectroscopie et de la modélisation. Ces phénomènes peuvent être importants par leurs conséquences pétrologiques et géochimiques, dont la mise en évidence constitue une approche complémentaire de ces processus. Un exemple

d'immiscibilité qui reste mal connu concerne les liquides silicatés, entre un domaine de compositions riches en Fe et un domaine riche en Si. L'occurrence de ce type de démixtion, relativement classique dans des magmas très réducteurs (exemples dans les basaltes lunaires), vient d'être observée au contraire dans un cas de conditions oxydantes (M.L. Pascal). Cette observation étend le domaine des conditions chimiques concernées et remet à l'ordre du jour, nous semble-t-il, la question - discutée épisodiquement et notamment dans les années 1950-1980 - du rôle de la démixtion dans la différenciation de certains magmas. Nous disposons aussi d'un échantillonnage d'occurrences de démixtion à l'échelle de l'affleurement (Complexe de Nicoya, Costa Rica), type d'observation à notre connaissance uniquement décrit par J. Tournon sur ces échantillons. Un point capital est le franchissement, possible par ce processus, de la barrière thermique entre magmas saturés et magmas sous-saturés en silice. C'est donc une éventualité à prendre en compte dans l'interprétation génétique des complexes alcalins associant roches à néphéline et roches à quartz comme celui de Messum (Namibie), étudié dans notre équipe (S. Blancher, P. D'Arco, M.L. Pascal, M. Fonteilles).

De même l'immiscibilité est un phénomène fréquent dans les fluides hydrothermaux liés par exemple aux dégazages magmatiques profonds. L'investigation détaillée de ces équilibres de phase est un outil important de l'étude des mécanismes éruptifs (voir l'exemple du Vésuve, Balcone_Boissard, Villemant et co-auteurs) et de l'évolution des phases fluides magmatiques (s.l.). Si ces mécanismes sont relativement bien étudiés expérimentalement, ils sont peu décrits dans les systèmes naturels, en particulier en milieu volcanique et dans les transferts de fluides profonds (fluides mantéliques, fluides crustaux et mantéliques dans les zones de subduction etc.).

L'étude des systèmes d'immiscibilité naturels et leur modélisation pétro-géochimique ainsi qu'en termes de structures et compositions minérales et de propriétés des physico-chimiques des liquides silicatés, des saumures et fluides aqueux met en jeu pour une grande part les compétences variées présentes dans la future équipe : c'est également un thème fédérateur que nous souhaitons développer.

4. Développement d'outils analytiques, expérimentaux et de modélisation

Les outils analytiques et expérimentaux (analogiques ou numériques) sont essentiels à notre activité. Une spécificité de notre équipe au sein de l'ISTeP est la contribution de ses membres aux développements de tels outils pour répondre à des questions spécifiques. Plusieurs membres contribuent aux développements analytiques. Par exemple : Mesure du degré d'oxydation du fer dans les verres et les minéraux (microsonde électronique, CAMPARIS), Analyse des halogènes dans les solides (extraction par pyrohydrolyse et analyses IC-ICP-MS), Analyses de traces dans des très faibles masses d'échantillons solides par ICP-MS (application aux inclusions, aux météorites, aux charges expérimentales...), Mesures de radioactivité γ naturelle (l'étude des mécanismes de dégazage au moyen du rapport $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$), Imagerie chimique (MEB ; cartographie chimique, textures, mesure des micro-cristallinités), Expérimentation hautes P et T (cellules diamant, presses gros volumes, grands instruments analytiques dont le rayonnement synchrotron X à l'ESRF), Ecriture d'éléments de codes pour la modélisation des minéraux et autres matériaux, etc.

Par ailleurs, le MEB et l'ICP-MS de la plateforme analytique du Pole 3 de l'université sont gérés par deux enseignants-chercheurs de l'équipe et leur fonctionnement assuré par deux ingénieurs de l'équipe. Les développements analytiques en cours, en particulier sur ces outils et en collaboration seront poursuivis. En particulier dans le cadre de la plateforme GI du pole 3 (UPMC, OSU Ecce Terra) le projet 'Analyse des traces in situ par ablation laser et ICP-MS' sera mis en place ; elle bénéficiera à plusieurs équipes de l'ISTeP.

5. Collaborations

Avec cette diversité de méthodes analytiques ou numériques et le caractère fondamental des investigations menées par cette équipe, l'ensemble de ces membres développe des collaborations avec nos proches voisins (IMPIC et autres laboratoires de physique et chimie de l'UPMC, les laboratoires de Géochimie-Cosmochimie, de Géochimie des Isotopes Stables et de Volcanologie de l'IPGP) et enfin avec d'autres laboratoires nationaux (CRPG, ENS-Lyon, ...) et internationaux (Université de Turin, Université d'Alberta, à Edmonton, Edimbourg -ERC Sanloup). Cette équipe a vocation à développer ces collaborations en particulier au travers de ses compétences analytiques non seulement avec l'extérieur mais aussi, ce qui est encore trop peu le cas, avec les autres équipes de l'ISTeP et ce sera l'un des objectifs prioritaires de l'équipe.