



RAPPORT D'ACTIVITE 2012 - 2013

INVESTISSEMENTS D'AVENIR – LABEX
RESSOURCES STRATEGIQUES POUR LE 21^{ème} SIECLE



RAPPORT D'ACTIVITE

2012-2013

1 - Présentation du Labex Ressources 21

2 - Axes de recherche

3 - Faits marquants 2012-2013

actions de communication

actions de formation

4 - Posters – Actions de recherche

5 - Bibliographie

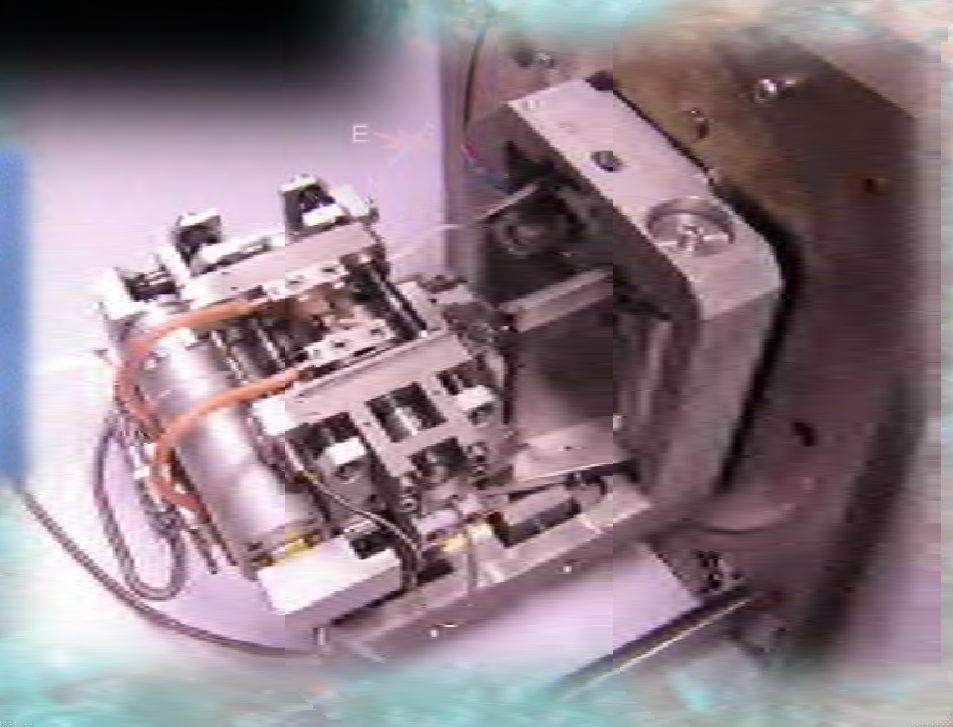
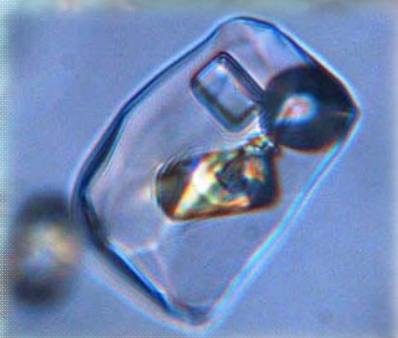
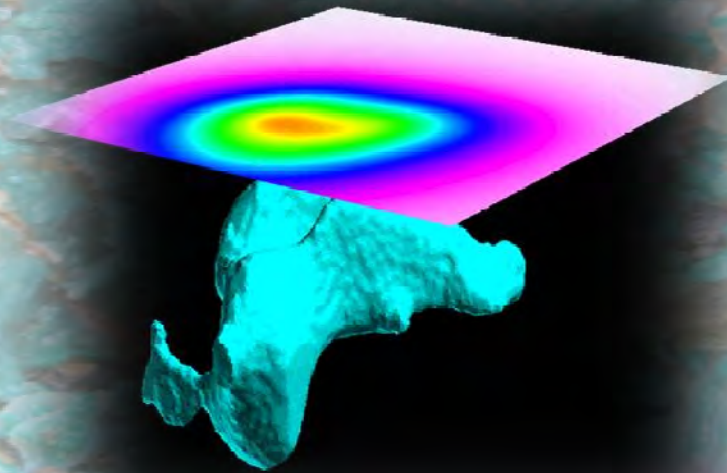
Articles, thèses, master, post-doc

- Annexe

Unités de recherche et formations Master



1 PRESENTATION DU LABEX RESSOURCES 21



Cycle géochimique lithosphérique
des éléments stratégiques



Valorisation des minerais, Flottation,
Bio-hydrométallurgie, Phytomine



Transferts vers les sols et l'hydrosphère,
Bio-capteurs, phytoremédiation





Laboratoire d'Excellence RESSOURCES21 : Ressources métalliques stratégiques du 21^{ème} siècle

ANR-10-LABX-21-01

www.ressources21.univ-lorraine.fr

Le projet RESSOURCES21, déposé dans le cadre de l'appel à projets "Laboratoires d'Excellence" (LabEx) 2010, a été sélectionné A+. Il a été porté par le directeur d'OTELo qui est, selon les termes de l'ANR, l'actuel coordinateur du projet.

Le projet RESSOURCES21 porte sur les ressources stratégiques en métaux pour l'énergie et les produits de haute technologie et concerne l'approvisionnement de la France et de l'Europe. Dans ce contexte, RESSOURCES21 s'attaque plus particulièrement aux ressources primaires en métaux stratégiques (terres rares, U, Ni notamment) en termes de processus géologiques de concentration, de minéralurgie et d'impact environnemental ainsi qu'à la gestion des ressources secondaires et le recyclage.

Les deux premières années du projet ont permis de mettre en place et de tester les dispositifs de gouvernance, de mobiliser les chercheurs et les enseignants-chercheurs des unités de recherche dans un contexte de fusion des quatre universités de Lorraine et de réorganisation des sept unités de recherche en quatre unités à partir de 2013 (CRPG, GeoRessources, LIEC, LSE). Les dispositifs d'animation et de coordination ont lancé les premiers appels à projets et appels à candidature qui se sont traduits par le recrutement en 2012 de quatre post-doctorants, six doctorants, d'une assistante et d'une ingénieure projet. Cinq chercheurs étrangers, Igor Sevostianov (USA), Li Guanglai (Chine), Michel Jebrak et Claude Fortin (Canada) et Cam McCuaig (Australie) ont été accueillis sur une durée comprise entre un et trois mois. Des liens particuliers ont été confortés avec des entreprises nationales majeures, AREVA et ERAMET, et avec le BRGM. D'autres se sont tissés avec des Laboratoires d'Excellence tels que Voltaire (Orléans), Sérénade (Aix-Marseille) ou Chemisyst (Montpellier-Marcoule). Les chercheurs se sont engagés dans différentes actions de diffusion scientifiques nationales et internationales par la

participation à différents congrès internationaux (SGA, SETAC) et l'organisation du congrès international SGA en 2015.

Au niveau national et européen, le label "Laboratoire d'Excellence" et les moyens financiers obtenus ont permis aux chercheurs du projet de retrouver une place dans les réseaux européens en cours de réorganisation depuis trois ans (réseaux ERAMIN et EODI - European ore deposit initiative) et de participer au groupe national "miroir" du réseau ERAMIN. Le LabEx RESSOURCES21 participe, au sein de l'Université de Lorraine, à différents groupes de travail visant à préparer la candidature de l'établissement à l'appel d'offres "KIC Raw Materials" de l'EIT, en partenariat avec la direction internationale du CEA et des partenaires de Suède, Finlande, Belgique, Allemagne, Pologne, Autriche, Espagne et d'Italie. On notera également la labélisation du projet européen FP7 STOICISM (pilotage IMERYS) ou du master Erasmus Mundus Emerald.

Sur le plan scientifique, les équipes du LabEx RESSOURCES21 ont engagé leurs travaux sur plusieurs groupes de métaux du point de vue des processus de concentration : les métaux de la filière photovoltaïque (Ga, Ge, In); les métaux rares (Nb, Ta) associés au magmatisme felsique peralumineux (Sn, W, Li); les concentrations en métaux des roches basiques latéritisées (Ni, Co, Sc); les terres rares (magmas carbonatitiques) et leur comportement comme marqueur des processus minéralisateurs. Par ailleurs, les équipes ont continué à travailler sur des métaux stratégiques par leur enjeu économique (U, Au) pour lesquels elles ont acquis une réputation internationale, et sur des métaux en traces connus pour leur impact environnemental (Cd, Ag, Cu, Ti) ou des métalloïdes (As). De nouveaux projets concernent par exemple l'enchaînement des processus concentrateurs en fonction du temps à l'origine des gisements de Ni latéritique et saprolitique (en coll. CNRT Nickel, Eramet,

Koniambo S.A.), le magmatisme et les métaux rares associés (W-Sn-Li-Nb-Ta) en collaboration avec M. Pichavant et le LabEx Voltaire et les processus de concentration et la distribution des métaux en traces (Ge, Ga, In ; terres rares ; métaux rares) dans les phases porteuses.

Ces projets s'appuient sur des développements méthodologiques pour l'analyse quantitative localisée des métaux en traces (ppm à centaine de ppm) dans les phases minérales et fluides, notamment par LA-ICP-MS et l'analyse des fractionnements isotopiques dans les processus de dépôt et de transfert vers la biosphère (Ge, Ni). Le développement de méthodes de datation K-Ar sur argiles, appuyé par la mise au point d'un équipement en cours de montage, est un enjeu analytique pour mieux caler dans le temps les processus concentrateurs. Les outils de modélisation (géométrie 3D et transport réactif) sont aussi en cours de développement pour des applications à plusieurs objets cibles (gisements de Ni et de type MVT (Pb-Zn,-Ge) afin de mettre les équipes au niveau des études menées dans certains pays miniers (Australie par exemple).

En termes de traitement des minerais, les travaux ont mis l'accent sur la séparation des minéraux à faible contraste de propriétés physiques, notamment par l'étude du fractionnement par des champs électro-magnétiques pulsés et/ou sur le choix de cocktails d'additifs pour la flottation sélective. Les challenges pour le futur concernent les aspects fondamentaux en bio-hydro-métallurgie, la réduction des quantités d'eau et l'étude du rôle du sel dans les processus de flottation. Enfin, la phyto-extraction ou remédiation reste un challenge au niveau international avec des études portant sur les processus d'incorporation des métaux dans les plantes hyperaccumulatrices.

Du point de vue de la dispersion des métaux dans le milieu naturel, l'approche (éco)toxicologique s'appuie sur une batterie d'effets classiquement utilisés (survie, croissance, reproduction) et de biomarqueurs biochimiques, cellulaires et comportementaux observés sur divers modèles biologiques. Les équipes s'appuient sur l'expertise acquise sur l'impact du Cd, Cu, et Ni et des particules de TiO₂ et sur une revue bibliographique de la littérature intégrant notamment les

informations sur la spéciation, la réactivité, la mobilité, le devenir, la bioconcentration des métaux ainsi que des données (éco)toxiques, le potentiel de transfert et la biodisponibilité. L'accent a été mis sur l'effet de métaux comme les terres rares dont les effets sur les organismes sont très mal connus. Des approches multi-biomarqueurs destinées à étudier les impacts sublétaux des nanoparticules de CeO₂ et de TiO₂ sur les écosystèmes aquatiques sont en cours de développement sur deux invertébrés aquatiques d'eau douce.

Deux projets de formation internationale en sciences de la Terre ont débuté en 2013 : Master Erasmus Mundus « Emerald » validé en 2012 (pilotage Université de Liège) et Master international (Duby) « Matières Premières Minérales Ingénierie et Management des Risques » piloté par l'Ecole de Géologie et l'Ecole des Mines de Nancy. Les laboratoires du LabEx ont candidaté à un ITN (International training network) dans le domaine des métaux critiques (projet CRITICAL soumis en 2012 et en 2013). Un accent a également été porté sur des actions de formation et de valorisation à l'exemple de l'accompagnement d'élèves ingénieurs de l'Ecole de Géologie et de l'Ecole des Mines au salon national annuel de la Société de l'Industrie Minérale (octobre 2012 et 2013), la participation à GEOLOGIA pour la promotion de la recherche à destination des étudiants de master et d'écoles d'ingénieur (Nancy ENSG, octobre 2012 et 2013) et au salon Québec Mines avec une délégation de dix personnes (étudiants, doctorants, enseignants et ingénieurs) de l'Université de Lorraine (novembre 2013). Les Géosciences Lorraines ont également été présentes au salon PDAC, référence internationale dans le domaine des ressources minérales (Toronto, février 2012 et 2013), pour présenter les formations et la recherche en Lorraine.

Après ces deux premières années d'existence, le projet RESSOURCES21 entre maintenant dans une nouvelle phase en réaffirmant ses objectifs et sa stratégie scientifique : ***métisser nos savoir-faire en géosciences et en environnement pour révéler le cycle naturel et anthropique des métaux et stimuler l'innovation pour le développement et la maîtrise des gisements du futur en métaux stratégiques.*** Les principaux enjeux sont résumés dans le tableau ci-dessous :

ENJEUX



PLURI-DISCIPLINARITE	RECHERCHE	FORMATION	VALORISATION DES RESULTATS DU LABEX
INNOVATION	Identification et exploitation des gisements du futur (où sont les ressources, pourquoi ? comment les exploiter?)	Former aux enjeux scientifiques à long terme du labex (ex: phytomine, recyclage, transition énergétique et écologique..)	Adhésion sociétale: Mine verte
INTERNATIONAL	Etre une référence internationale (cycle naturel et anthropique des métaux)	Développer des cursus de formation internationaux	Réseaux Internationaux et projets Européen

Les équipes préparent dans ce contexte des projets multidisciplinaires pluriannuels basés en 2014 sur le nickel et les métaux associés dans les altérites ultrabasiques et sur les terres rares pour (les projets) 2015.

La suite de ce document explicite les principaux résultats scientifiques par axes de recherche et les faits marquants du projet RESSOURCES21.

Sont présentés à la suite sous forme de posters, les principales actions de recherche financées en 2012 et en 2013 par le LabEx RESSOURCES21, puis la production des équipes du LabEx (thèses, masters, publications et résumés) sur la thématique large du comportement des métaux et des innovations méthodologiques, analytiques, ou de modélisation qui servent les recherches du LabEx.

Nous vous en souhaitons une bonne lecture.

F. Villiéras et M. Cathelineau

Rappels des objectifs scientifiques généraux

L'exploitation des ressources ne peut plus s'envisager sans une approche intégrée du cycle de la matière depuis sa prospection, son extraction, son traitement, son suivi et la minimisation maximale de son impact environnemental. C'est ce cycle qui sous-tend les projets du LabEx RESSOURCES21.

Les cycles des métaux stratégiques

La connaissance du cycle des métaux stratégiques et les facteurs qui contrôlent leur concentration reste très en deçà de ce qui est connu pour les métaux de base. Le mode particulier d'occurrence de ces éléments parfois sous des formes propres mais le plus souvent substitués à l'état de traces dans les minéraux majeurs (par exemple Ge dans la sphalérite, Sc dans les oxydes de fer, Ta dans la wolframite), et la répartition de ces éléments à l'échelle de gisements (teneurs depuis le minéral jusqu'au gisement, tonnages) ou de provinces est en grande partie inconnue. Les enjeux sont en premier lieu une bonne connaissance de la répartition des éléments stratégiques dans les minéraux, et leur mode d'introduction dans les systèmes métallogéniques (quand, comment, en relation avec quel événement fluide ?). Ceci fournit le socle à la fois pour les études de valorisation qui ont besoin de ce niveau de connaissance sur les phases porteuses, et pour l'établissement de modèles pour leur prospection.

La valorisation innovante et éco-responsable des minerais

Traitement des minerais : sous la pression des facteurs mondiaux, l'industrie minière, quelle que soit la ressource à laquelle elle s'intéresse, se confronte à des défis technologiques majeurs, notamment l'exploitation de ressources à faibles ou très faibles teneurs en substances utiles. Par exemple, des teneurs avoisinant la centaine de ppm en U sont actuellement exploitées, où l'U est porté par des carbonates, avec une zonalité complexe. De même, on envisage pour l'U, le recours à des ressources non conventionnelles pour la valorisation du pyrochlore ou de minéraux réfractaires, l'exploitation et la valorisation des ressources sous-marines, ou encore, l'exploitation de ressources secondaires, comme les résidus miniers après récupération d'une autre substance majeure. Dans un proche avenir, le recours aux ressources minérales marines conduira à considérer la réactivité de phases en milieux de forte force ionique et ouvrira de nouvelles voies de flottation dans l'eau de mer ou de

modélisation de la germination dans les saumures industrielles.

La rareté des matières premières conduira nécessairement à une économie de plus en plus circulaire dans les années et les décennies à venir. Dans ce contexte, le monde industriel apporte une réponse adaptée à deux types de pressions majeures. En premier lieu, les conditions économiques du moment et du lieu poussent à valoriser des ressources secondaires et à récupérer des valeurs contenues. Cette approche se décline de deux façons : soit extraire de petits volumes de matières nobles directement valorisables (or, argent, platine, métaux non ferreux...), soit éliminer d'un matériau à grand volume des espèces pénalisant leur emploi (métaux amphotères, sulfates dans les scories), le gain principal étant de ne plus avoir à les gérer.

La prévision et le suivi du comportement des éléments métalliques dans l'environnement

La protection de l'environnement et le souci d'éviter les gaspillages, que l'on englobe souvent sous le terme de « développement durable » (« sustainable development ») posent aux exploitations minières (actives, ou abandonnées) des problèmes nouveaux dont la solution demande, en général, des avancées scientifiques. Par ailleurs, un certain nombre de développements technologiques ont conduit à l'utilisation croissante des terres rares et métaux rares dans un large éventail de procédés industriels. Du fait de leur extraction, fabrication, utilisation et des déchets générés, le cycle biogéochimique naturel des terres rares (REE) et des métaux rares (MR) est progressivement perturbé par les REE et MR anthropiques, ce qui soulève des questions quant à leur impact possible sur la santé humaine et sur l'environnement. La plupart des MR ont été signalés comme toxiques pour l'homme (en particulier le Be et le Nb) : ils peuvent provoquer une irritation oculaire et dermique, des maladies rénales et des perturbations de la transmission nerveuse ainsi que des cancers en fonction du MR considéré, en particulier des effets génotoxiques ont été signalés pour le béryllium. Les REE et les MR, comme beaucoup d'autres contaminants anthropiques, peuvent contaminer les écosystèmes et ainsi affecter des organismes vivant dans les eaux et les sédiments, et il est donc essentiel d'en déterminer les impacts.

Stratégie scientifique

La stratégie scientifique du LabEx RESSOURCES21 s'appuie sur une analyse et une

philosophie communes qui sont ressorties (qui ont émergé) des ateliers d'analyse stratégique. Ont ensuite été définis les objectifs suivants :

- produire « la meilleure science possible » et innover dans le domaine du cycle des métaux qu'il soit naturel ou anthropique (cycle de vie) ;
- contribuer au rayonnement des équipes lorraines et donc françaises dans ce domaine, et devenir un pôle de référence dans le domaine des « Raw materials (matières premières minérales).

Les travaux scientifiques ont été orientés sur plusieurs axes centrés sur des métaux, ou bien sur des approches ou des développements méthodologiques. Les métaux sur lesquels travaille le LabEx RESSOURCES 21 sont :

- des métaux de grand intérêt pour l'économie (Ni), et/ou pour les industriels français (Ni, U), métaux pour lesquels les équipes du LabEx avaient déjà beaucoup d'expérience ;
- des métaux stratégiques (ou « critiques ») correspondant aux besoins du monde industriel (transition énergétique en premier lieu) et pour lesquels les équipes du LabEx ont dû ou devront développer de nouveaux savoir-faire et des

recherches intégrées nouvelles par rapport à leurs domaines d'intervention habituels (métaux critiques de la filière photovoltaïque (Ge, In (Ga)), terres rares, Sc, Sb...).

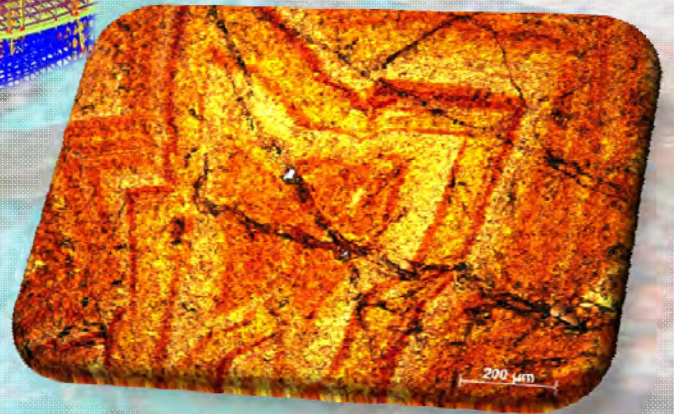
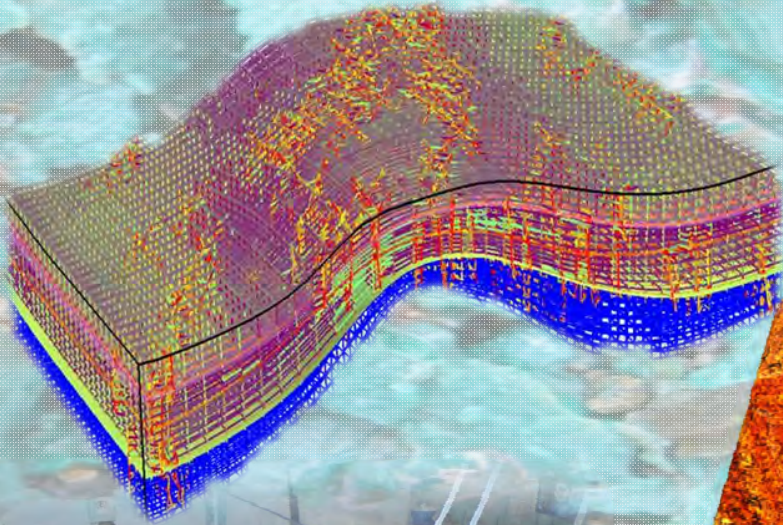
L'objectif affiché pour les années à venir est d'intégrer l'effort de recherche dans au moins deux programmes tri-annuels thématiques centrés sur des contextes miniers ou des associations élémentaires permettant de développer des approches innovantes aux interfaces entre domaines scientifiques, disciplines et approches (analytiques, expérimentales, modélisation).

Les deux programmes en cours de maturation sont les suivants:

- le cycle métamorphique/ hydrothermal puis superficiel des métaux associés aux roches basiques à ultrabasiques (Ni, Co, Mn, Sc), jusqu'à l'impact éco-toxicologique (transferts vers la biosphère et l'hydrosphère) ;
- le cycle des terres rares, notamment celles d'intérêt pour les nouvelles filières technologiques et liées aux transitions énergétiques (éoliennes, voiture électrique, ..), comme Nd, Dy...



2 AXES DE RECHERCHE SYNTHESE DES RESULTATS



Genèse des concentrations minérales - PRA1

Marie-Christine BOIRON et Béatrice LUAIS

Contexte socio-économique

Le secteur des matières premières minérales revient de manière durable un sujet d'intérêt en raison de la très forte demande des économies chinoises et indiennes ou dans la perspective programmée d'une raréfaction des matières énergétiques (pétrole, uranium). Les travaux de la Commission Européenne (rapport CE 2010) ont par ailleurs montré qu'un certain nombre d'éléments, notamment métalliques risquaient à brève échéance de devenir l'objet de convoitises internationales en raison de leur rôle stratégique dans des technologies de pointe. Ainsi, quatorze éléments ont été déclarés stratégiques, (par exemple Li, Co, Ni, Ge, Nb, In, Sb, Ta, Re, Pd, terres rares) auxquels on peut rajouter les enjeux internationaux sur les métaux de base (Cu, Zn, Fe,...) ou d'autres métaux comme U, Th pour leur intérêt énergétique. Ga, Ge, In, Sc Dy, Te et quelques terres rares lourdes sont ainsi considérés comme des métaux rares (MR) car proches du seuil de disponibilité. Un déficit d'approvisionnement est donc possible à brève échéance. Cette situation a conduit les acteurs nationaux à relancer une politique active de soutien à l'exploration, la production, le recyclage et la gestion environnementale des ressources minérales primaires et secondaires.

Dans le cadre du LabEx RESSOURCES21, les premiers groupes de métaux sur lesquels un accent a été mis sont les suivants : les métaux de la filière photovoltaïque (Ga, Ge, In) ; les métaux rares (Nb, Ta) associés au magmatisme felsique peralumineux (Sn, W, Li) ; les concentrations en métaux des roches basiques latéritisées (Ni, Co, Sc) ; les terres rares (magmas carbonatitiques) et leur comportement comme marqueur des processus minéralisateurs.

Enjeux scientifiques

Les travaux cherchent à mieux comprendre le cycle des métaux et les facteurs régulant à la fois leur concentration, y compris l'incorporation en traces dans les minéraux majeurs, et leur répartition à l'échelle de gisements (teneurs depuis le minéral source jusqu'au gisement) ou du système métallogénique dans son ensemble. La construction de modèles métallogéniques basés sur l'évolution spatio-temporelle de la chaîne source-extraction-transport-piégeage-préservation est un objectif majeur de cette action scientifique. Les axes de recherches sont particulièrement focalisés sur : i) la compréhension du fonctionnement des systèmes

métallogéniques, ii) les processus de concentration, avec un accent particulier sur les métaux dit « stratégiques ».

Approche méthodologique

L'approche méthodologique s'appuie sur l'analyse multi-élémentaire ponctuelle des métaux en faible teneur dans les minéraux et la mesure des isotopes stables de métaux, afin de tracer les processus lithosphériques (fractionnement élémentaire en présence d'une phase fluide, caractérisation des roches sources, recyclage crustal). Il s'agit d'améliorer les compétences analytiques de multi-tracéage des sources des éléments et des fluides, de dater de manière précise les différentes étapes des processus de concentration, d'identifier les associations organométalliques et de comprendre leurs cycles géochimiques. L'ensemble des données acquises seront utilisées dans les modèles 3D intégrant les processus de transfert de masse et de chaleur et seront interprétées à l'échelle régionale. Ces travaux sont totalement transverses avec les actions « Frontières Analytiques » et « Modélisation ».

Résultats

Les travaux réalisés en 2013 s'articulent autour des thématiques suivantes :

1. Distribution et processus de concentration des métaux d'intérêt économique (Ni, Mn, Co, Cr) au sein du profil d'altération sur l'exemple de la Nouvelle-Calédonie

Un accent particulier a été mis sur la compréhension de la mobilité du scandium et dans une moindre mesure des terres rares avec l'identification des phases porteuses potentiellement présentes dans ce contexte (Post-Doctorat LabEx de Marc Ulrich). L'objectif de ces travaux est de mieux comprendre les processus de transport et de piégeage de ces métaux dans les altérites en lien avec les connaissances acquises sur Ni et Co.

Les analyses géochimiques de profils développés sur différents protolithes (dunite, harzburgite, lherzolite, gabbros et autres intrusifs) de plusieurs massifs ont permis d'identifier certains niveaux d'enrichissement en Sc dans les profils d'altération, en particulier l'horizon de saprolite fine (latérite jaune des mineurs) et l'horizon de transition. Les teneurs en Sc dans les profils varient de 7 ppm dans le protore harzburgitique à 75 ppm dans les latérites jaunes. L'utilisation du LA-ICP-MS pour

l'analyse quantitative du scandium à l'échelle d'une dizaine de micromètres a permis de faire des progrès importants dans la localisation du scandium au sein des hétérogénéités des faciès de limonite rouge et des pisolites des cuirasses. En revanche, les concentrations en terres rares ne sont pas élevées dans les latérites, par rapport à celles mesurées sur des profils développés sur des roches enrichies en terres rares (carbonatites, intrusions alcalines). L'extrême pauvreté en terres rares des péridotites (concentrations inférieures aux chondrites dans les harzburgites) ne permet pas d'envisager des concentrations significatives sur les faciès ultrabasiques. Les concentrations en terres rares peuvent cependant atteindre entre 1 et 10 fois les chondrites dans les goethites et les cuirasses en raison de l'enrichissement relatif lié au processus latéritique, ce qui est cependant 10 fois inférieur aux concentrations déterminées dans les profils sur roches similaires à Cuba.

2. Le cycle des métaux stratégiques dans les concentrations métalliques

Les questionnements scientifiques autour du cycle des métaux stratégiques concernent leurs mécanismes de concentration ou de pré-concentration dans les phases porteuses, la distribution et les teneurs de ces éléments dans les minerais, les sites et mécanismes de précipitation, la composition des fluides hydrothermaux et l'identification des paramètres thermodynamiques contrôlant l'origine de ces concentrations, les moteurs de circulation des fluides. L'ensemble de ces paramètres est à considérer dans le contexte géologique et géodynamique des différents types de gisements.

De nombreux métaux dont Ge, Ga, In sont concentrés en conditions hydrothermales en relation avec des gisements de sulfures (Pb, Zn, Cu) dans différents contextes : i) circulation de saumures dans les socles et leur couverture sédimentaire en contexte extensif ou compressif (gisements de type MVT ss), ii) hydrothermalisme sous-marin lié à la formation d'amas sulfurés, iii) convection de fluides de multiples origines dans des contextes d'exhumation en fin d'orogène.

Les travaux réalisés en 2012-2013 couvrent plusieurs aspects de ces cycles élémentaires : i) des travaux focalisés sur le métal Germanium, ii) des travaux sur les facteurs de précipitation des sulfures, iii) des travaux sur les contextes géodynamiques favorisant les mouvements de fluides.

Cycle du Germanium dans les concentrations métalliques : traçage élémentaire, isotopique et approche expérimentale

L'originalité des travaux (Thèse LabEx de Rémi Belissant, (financement LabEx RESSOURCES21/Région Lorraine) démarrage

octobre 2012) réside dans le couplage d'analyses élémentaires in situ par LA-ICP-MS (Ge et éléments mineurs/traces associés) et isotopiques (Ge) par MC-ICP-MS. Ces analyses du Ge et des éléments métalliques associés sont focalisées sur les gisements de Saint-Salvy (SO Massif Central, France), de Kipushi (Copper Belt centre-africaine, Rép. Dem. Congo) et Barrigão (Ceinture pyriteuse ibérique, Portugal). Dans le cas des sphalérites du gisement de Saint-Salvy, dont les teneurs en Ge peuvent atteindre 2500 ppm, les analyses par LA-ICP-MS mettent en évidence un contrôle cristallographique de l'incorporation des éléments mineurs/traces. Deux groupes d'éléments se distinguent nettement dans les différents types de zonages observés: Fe, Cd, In et Sn sont corrélés dans les zonations rythmiques ; Cu, Ge, Ga, Sb et Ag sont corrélés dans les zonages sectoriels. Ces corrélations suggèrent des mécanismes de substitution couplés et étendus pour les éléments mono-, tri- et tétravalent, dans lesquels Cu, monovalent, équilibre les charges. La large gamme de composition isotopique du Ge ($\delta^{74}\text{Ge}$ de -2,07 à +0,91‰) confirme le modèle de précipitation de la sphalérite en système ouvert à partir de fluides hydrothermaux de basse température, injectés par pulses périodiques (Belissant et al., 2013, *Geochim. Cosmochim. Acta*, sous presse). Les analyses préliminaires sur les gisements de Kipushi et Barrigão mettent en évidence une plus forte affinité du Ge pour les phases cuivrées (e.g., chalcopyrite, bornite, cuivre gris) que les phases zincifères (e.g., sphalérite). Ces sulfures de Cu co-précipitent avec des sulfures de Cu-Ge (e.g. rénierite, germanite) dans le cas de Kipushi. D'autre part, une étude de l'état d'oxydation du Ge et d'éléments accompagnateurs (Cu, Fe) est en cours d'interprétation sur la base d'analyses μ -XANES au synchrotron de l'ESRF Grenoble (octobre 2013, ligne BM23). Des travaux expérimentaux de synthèse de sphalérites enrichies en Ge sont en cours afin d'étudier les mécanismes d'incorporation du Ge dans la sphalérite et quantifier le fractionnement isotopique du Ge lors de sa précipitation.

Rôle de la thermo-réduction des sulfates dans l'origine des gisements de type Mississippi Valley-type deposits - L. Truche (GéoRessources) (PRA1 et PRA4)

Le processus de thermo-réduction des sulfates (TSR) est un processus abiologique conduisant à la réduction de sulfate en sulfure d'hydrogène sous l'effet de la température. Il pourrait avoir un rôle important dans les mécanismes de formation de gisements, métalliques sulfurés de type MVT, la production de sulfures conduisant à la concentration de métaux (Pb, Zn). Les études expérimentales récentes ont montré des vitesses élevées (facteur

100) de réduction de sulfates en présence d'hydrogène et de métaux dissous (Zn, Fe, Ni, Al et U) et ne nécessite plus la présence initiale de sulfures pour être activée.

Le but de ce projet a été d'élargir l'étude précédente à des conditions thermodynamiques plus proches de celles des gisements MVT, T=150-250°C, pH neutre, saumures chlorurées ou fluorées et en présence de métaux soit dissous (Zn^{2+} et Pb^{2+}) soit présents dans les minéraux (pyrite, hématite, magnétite), et en présence de méthane. Les analyses des spectres Raman obtenus sur les produits de réaction à haute température (jusqu'à 350°C) dans le système $MgSO_4$ -S- H_2O - CH_4 démontrent (1) que la diminution du soufre se fait à des températures au-dessus de 200°C et produit des sulfures et des sulfates et (2) que les sulfates en présence de sulfures peuvent être réduits par le méthane à des températures aussi faibles que 200-300°C en quelques heures/mois pour produire CO_2 et H_2S . Ce sont les températures les plus faibles reportées jusqu'à maintenant pour ce processus, et compatibles avec les conditions qui prévalent dans les gisements MVT.

3. Fluides et métallogénie des métaux de base (Pb-Zn-Cu-Ag-Au) autour des plutons syntectoniques du domaine égéen

Ce projet (A. Tarantola, GéoRessources) est focalisé sur la reconstruction et la compréhension des circulations fluides à l'échelle de la lithosphère tout au long d'un cycle orogénique, depuis la subduction, jusqu'à l'effondrement de la chaîne, ainsi qu'à la caractérisation de l'évolution des gîtes métallifères associés au contexte hydrothermal. La région du Laurion (Grèce Continentale) a été choisie en raison de sa position stratégique au sein du « Metamorphic Core Complex » Egéen, et de ses richesses en métaux (Pb-Zn-Fe-Cu-Ag-Au), exploités depuis l'antiquité. Le comportement d'autres métaux en traces dans ces contextes n'est pas actuellement connu mais sera étudié.

Un travail cartographique et structural détaillé de la région, ainsi que l'étude pétrographique, géochimique, et des inclusions fluides (projets de Master 1 et 2, 2012, 2013) ont été effectués sur des échantillons provenant des réseaux de veines et des lithologies encaissantes en limite de contacts lithologiques et tectono-métamorphiques associés ou non aux systèmes métallifères. Ils ont permis d'identifier et de contraindre (P, T) deux épisodes métamorphiques majeurs du Laurion, avec une phase D2 (12,5 Kbar, 350 °C – Schistes bleus) rétrotransformée par une phase D3 (6 Kbar, 550 °C – Schistes verts). Ces données ont permis de recadrer l'histoire géodynamique du Laurion en contexte de marge passive et de marge active. Les fluides associés au contexte géodynamique et aux

événements minéralisateurs seraient contrôlés par la phase de mylonitisation de la région.

Ce projet se poursuit dans le cadre de la thèse de Christophe Scheffer (Thèse MNERS) sur la thématique des circulations fluides à l'échelle de la région du Laurion et de l'Eubée (Grèce).

4. Les métaux associés au magmatisme felsique

- Le magmatisme et métaux rares, W-Sn-Li-Nb-Ta

La chaîne varisque européenne est particulièrement riche en métaux rares (W, Ta, Nb, Li, Sn), qui s'y trouvent sous forme de minéralisations disséminées dans des granites spécialisés et de systèmes filoniens périgranitiques à quartz-wolframite-sulfures. Sans être le plus riche, le Massif Central Français possède de nombreuses occurrences de concentrations à métaux rares, dont l'importance économique reste à redéfinir. Les objectifs de la thèse LabEx ayant débuté en juillet 2013 (Matthieu Harlaux) sont de : (1) dater le ou les événement(s) minéralisateur(s) à l'échelle de la chaîne varisque ; (2) identifier le comportement des métaux rares en traces dans la wolframite et minéraux associés ; (3) caractériser les circulations fluides dans les environnements minéralisés ; (4) identifier les sources des fluides et des métaux.

Plusieurs cibles ont été choisies dans le Massif Central Français : i) la mise à disposition d'anciennes collections sur le gisement de Puy-les-Vignes (Limousin), permet de reprendre l'étude des phases minérales et des fluides associés à la minéralisation à tungstène (Nb, Ta) ; ii) la région des Cévennes sur la bordure sud-est du Massif Central, où sera étudié un système filonien à wolframite, dont on a pu démontrer la formation tardi-cinématique dans une déformation régionale elle-même syn-métamorphique de basse pression. D'autre part, des granites tardi-varisques et leurs roches encaissantes, permettront de caractériser la mobilité du tungstène et des métaux associés dans les fluides mis en circulation lors de la mise en place des intrusions granitiques. Des comparaisons avec les minéralisations du Sud-Est de la Chine seront réalisées dans le cadre d'un travail de master.

- La genèse et l'évolution des principaux gisements de Terres rares : les carbonatites. Exemple de l'Oldoinyo Langaii, Tanzanie - L. France (CRPG)

Ce volcan est unique au monde pour l'émission de magma carbonatitique qui concentre les terres rares, alternant dans le temps avec un magma silicaté. L'étude pétrographique et minéralogique préliminaire d'enclaves (Master 2, G. Beaudoire) a permis de mettre en évidence des liquides magmatiques piégés, soit dans les minéraux (occurrence d'inclusions vitreuses), soit aux joints de grains. A partir de la composition chimique de ces verres, différents types et générations de magmas

sont identifiés : la composition du magma évolue par cristallisation fractionnée depuis des phonolites en profondeur (500 MPa), vers des néphélines. La cristallisation en profondeur et à température élevée (1000°C) est associée à la démixtion par immiscibilité de magma Ca-carbonaté. Cette étude met en évidence des mécanismes d'immiscibilité à différentes étapes de l'évolution du magma. L'objectif futur sera de contraindre l'évolution temporelle de la concentration des terres rares durant les différents stades de cristallisation, afin d'identifier les conditions physiques qui permettraient d'atteindre le niveau de concentration élevé en TR caractéristiques des gisements associés aux carbonatites.

Ce projet est poursuivi dans le cadre de la thèse de Gaëlle Mollex (2013-2016 ; co-financement LabEx RESSOURCES/Région Lorraine), qui complètera cette approche par une étude expérimentale (Coll M. Schmidt, ETH Zurich), ainsi qu'une étude comparative avec un site minéralisé en REE.

- L'origine de l'horizon B1 des komatiites: approche expérimentale, application aux platinoïdes (PGE, Ni, Cu dans sulfures) - François Faure (CRPG)

Les coulées de komatiites, roches ultramafiques essentiellement archéennes, sont connues pour contenir des amas sulfurés présentant des concentrations en nickel, cuivre et PGE (éléments du groupe du platine) d'importance économique. L'origine des métaux semble sans conteste liée à la nature primitive des magmas komatiitiques. En revanche, l'origine du soufre serait liée à une assimilation par les coulées de leurs encaissants sédimentaires riches en sulfures, lors d'évènement de surchauffe, ce qui est en contradiction avec la structuration des coulées de komatiites en horizons bien définis.

L'objectif de cette étude est de reproduire expérimentalement la morphologie complexe des cristaux d'olivine observée dans l'horizon B₁ des coulées de komatiites, afin de retracer l'histoire thermique. Il est montré que les cristaux observés dans l'horizon B₁ se sont formés initialement au toit et ont sédimenté jusqu'au cœur de la coulée. Les calculs de refroidissement des coulées associés aux vitesses de chute des cristaux dans le magma permettent ainsi de proposer le premier modèle global de refroidissement d'une coulée de komatiite, et impose des contraintes sur l'épaisseur de l'horizon B₁. Des mesures de terrain précises de l'horizon B₁ de différentes coulées de komatiites devraient permettre d'affiner les paramètres de mise en place de ces coulées et de mieux comprendre la formation et la localisation des amas sulfurés associés.

En parallèle, des actions ponctuelles financées et engagées en 2013 ont été soutenues afin de mettre en

place des collaborations scientifiques et d'enseignement:

- J. Cauzid : *Collaboration avec les scientifiques et industriels Marocains pour permettre l'organisation d'une excursion au Maroc dans le cadre du congrès SGA Nancy 2015*. Les premiers contacts ont été pris dans le cadre du congrès 3MA8 2013 à Marrakech avec M. Bouabdellah pour des choix prévisionnels de sites métallogéniques. Des échanges scientifiques ont ensuite été établis avec des cadres de la compagnie CMT et des universitaires Français et Marocains sur le gisement de Tighza.

- J. Dubessy : *Etude de la faisabilité de l'étude de la spéciation de l'uranyle ou de terres rares en solutions chlorurées acides basée sur la spectroscopie d'absorption UV-visible en fonction de la température (jusqu'à 250°C)*. Il s'agissait d'une mission au laboratoire de Géochimie expérimentale IGEM (Académie des Sciences de Russie) pour tester une cellule permettant de réaliser des spectres d'absorption UV-visible de solutions aqueuses. Les spectres obtenus de grande qualité sont néanmoins très complexes à interpréter.

Perspectives de développement de la thématique

Les perspectives pour cette thématique concernent la poursuite des travaux dans les trois axes majeurs (métaux stratégiques, nickel et métaux rares). Les projets individuels sont des projets d'ouverture qui permettent de démarrer des recherches sur de nouvelles thématiques non encore explorées.

D'autre part les travaux entre les thématiques transverses (PRA1, PRA4 et PRA5) se poursuivront sur i) la physico-chimie des processus de transport et de dépôt par des approches expérimentales et de modélisation et ii) la modélisation des transferts de masse dans les milieux fracturés.

Livrables (thèse, publication, équipement...)

La liste des publications relatives à cette action de recherche est donnée en fin du rapport.

Implication sur le développement de la recherche partenariale et de la recherche

Les équipes du LabEx ont été fortement impliquées :
- dans des travaux menés en partenariat avec de grands leaders miniers notamment dans le cadre des contrats européens (PROMINE, Talvivaara mine (Finlande), Kupferschiefer (Pologne)), dans le cadre de travaux de master et thèse (Koniambo, SA, Xtsrata, thèse ayant débuté en octobre 2012 en coll. Geosciences Rennes ; nouveaux travaux sur les poussières industrielles des sites miniers de Koniambo, Nouvelle Calédonie)

- dans des travaux avec des juniors (nouvelle étude avec Mawson Resources, gisement de Rompas (U-Au, Finlande), gisement de terres rares à eudyalite (Norra Karr, Suède) ;
- avec les compagnies françaises (Areva (gisements d'U, du Kazakhstan, du Niger, du Canada, très forte activité partenariale du CREGU) et des sociétés exploitant le nickel en Nouvelle Calédonie (travaux dans le cadre du CNRT Nickel).

De nouvelles collaborations ont été initiées à l'échelle européenne avec GTK (Finlande), LNEG

(Portugal), et renouées avec des laboratoires européens (Southampton, Liège, Leuven, Aachen Lulea) grâce à la participation des chercheurs nancéens à différentes réunions (EODI, ERAMINE).

L'activité contractuelle est soutenue au sein des laboratoires du LabEx sur les thématiques concernant la métallogénie et le traitement des minerais, ce qui explique la place importante jouée par les laboratoires du LabEx RESSOURCES21 de l'OSU OTELO dans la reconnaissance de l'activité partenariale de l'Institut Carnot ICEEL.

Traitement des minerais – PRA2

Lev Filippov, Guillaume Etchevaria et Jean Louis Morel

Les gisements et les terrains à faible teneur en métaux deviennent des enjeux pour le futur, et demandent des recherches afin d'adapter les processus de valorisation. Ainsi, par exemple, dans le cas des minerais d'uranium basse teneur, le traitement conventionnel utilise des procédés minéralurgiques qui ne permettent pas aisément la réduction de consommation de réactifs de lixiviation. Le but des travaux est alors de développer des procédés de valorisation visant l'amélioration du procédé d'exploitation (lixiviation alcaline en tas) en prenant en compte la variabilité minéralogique et texturale du minerai.

Pour les sols à concentration anormale (en Ni par exemple), il est désormais démontré qu'il est possible d'extraire le nickel à partir d'un sol développé sur des roches contenant des concentrations élevées en Ni sans pour cela être des minerais basse teneur. La phytomine constitue une des alternatives à la mine traditionnelle.

Les minerais non conventionnels comme ceux issus de l'exploration sous-marine constituent enfin de nouveaux objectifs pour le traitement en raison de leur spécificités et de leur environnement.

Ce sont ces trois aspects qui ont été étudiés dans le cadre du PRA2.

Valorisation des minerais à faible teneur et à faible contraste de séparation : cas du minerai d'Uranium (thèse à financement Areva, financement équipement par le Labex)

Le gisement de Trekkopje est composé d'un calcrète et d'un gypscrète. Le minéral porteur de l'uranium est la carnotite ($K_2(UO_2)_2[VO_4]_2 \cdot 3H_2O$). Les minéraux de gangue sont composés de silicates tels que le quartz (23 %), les feldspaths (63 %), les micas (0,8 %) et de minéraux du calcium, la calcite (10 %) et le gypse (0,12 %) (analyses en DRX, ICP-MS).

Un traitement d'images MEB a permis d'étudier les propriétés texturales et la surface exposée des inclusions dans les amas d'argiles. Dans le calcrète broyé à -200 μm , 50 % de l'ensemble de la carnotite (figure 1) est en moyenne associée aux amas d'argiles, composés à 98 % de palygorskite, 2% d'illite, de montmorillonite et d'interstratifiés (analyses DRX et microsonde électronique). La taille des grains de carnotite est à 95 % inférieure à 70 μm .

La calcite est la principale inclusion dans les amas d'argiles avec un taux moyen d'inclusion de 12% tandis que celui de la carnotite s'élève à 5%. Le pourcentage moyen de surface exposée de ces minéraux, dans les amas, est de 6% et de 3%,

respectivement, ceci indiquant que les inclusions ne devraient pas influencer le comportement des particules mixtes d'argile. Cependant, les essais de flottation sur minerai n'ont pas vérifié cette hypothèse.

Trois voies de séparation minérales ont été proposées en fonction de l'aptitude des minéraux à consommer le réactif de lixiviation : les minéraux calciques des silicates, la palygorskite des minéraux de gangue et la carnotite des minéraux de gangue.

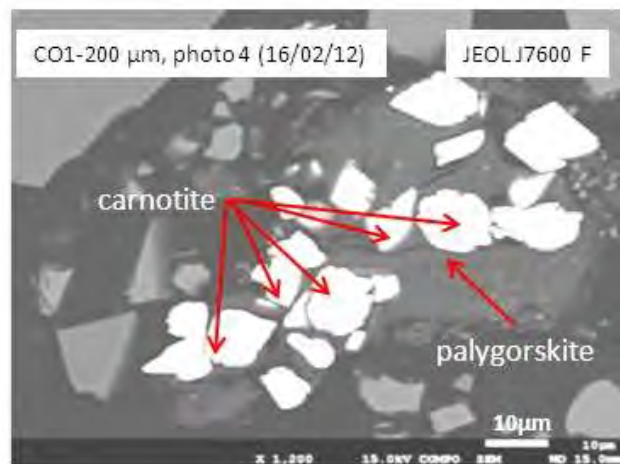


Figure 1 : carnotite associée aux amas de palygorskite dans la calcrète du minerai de Trekkopje broyé à -200 μm .

Une étude des propriétés électrocinétiques en électrophorèse des silicates et des minéraux calciques a été réalisée afin de choisir les collecteurs et l'intervalle de pH optimal à une flottation sélective. Un pH basique proche de la neutralité est révélé optimal pour la séparation des minéraux de gangue avec des collecteurs cationiques ou anioniques en s'appuyant sur les valeurs de PIE des minéraux : silicates pH 1-2, palygorskite pH 3, francolite pH 3-4 et minéraux du calcium pH 9-10.

Les isothermes d'adsorption des amines primaires avec un réactif non ionique, obtenues par chromatographie gazeuse, mettent en évidence leur adsorption sur la surface des phyllosilicates à pH 8 (figure 2). La présence du réactif non ionique permet la formation d'une couche d'adsorption plus dense sur la surface minérale déduite des déplacements des bandes de vibration symétriques et asymétriques des groupements CH_2 , CH_3 sur les spectres infrarouge en réflexion diffuse.

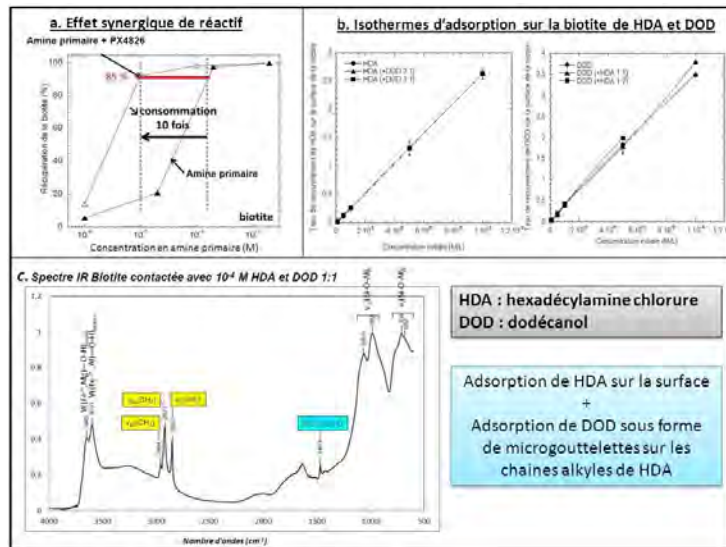


Figure 2 : a. Taux de récupération de la biotite avec une amine primaire utilisée seule ou avec un réactif non ionique à pH 8 ; b. Isotherme d'adsorption de HDA et DOD sur la biotite utilisée seule ou en mélange à pH 8 ; c. Spectre infrarouge de la biotite contactée avec HDA et DOD 1 : 1 à pH 8.

La palygorskite est séparée de l'ensemble de minéraux calciques et silicates purs à pH 8, avec un mélange de collecteurs tels qu'une amine primaire et un alcool aliphatique sans utiliser de déprimants spécifiques. Une séparation nette entre minéraux du calcium et des silicates est réalisée à pH 8 en combinant l'oléate de sodium avec le même réactif nonionique. Des effets synergiques des mélanges de réactifs ioniques avec un réactif non ionique ont été mis en évidence avec un abaissement de la consommation en réactif ionique de deux à dix fois (figure 2).

Les essais de flottation en cellule mécanique de laboratoire de 1L sur le minerai ont confirmé les résultats obtenus en flottation des minéraux purs avec les collecteurs anioniques. L'élimination des minéraux du calcium (produit flotté contenant 25% d'uranium), des silicates (produit non flotté contenant 75% d'uranium) en utilisant une combinaison d'oléate de sodium et d'un alcool aliphatique est la voie de séparation par flottation retenue (figure 3).

Cette étude conduit à des résultats exploitables par couplage des approches multi-échelles dans l'analyse et dans la résolution du problème posé.

Valorisation des sulfures hydrothermaux marins

Les conditions de formation des sites VMS sont assez connues mais l'inventaire est très incomplet (plusieurs centaines de sites pressentis). Les sites montrent une grande variabilité de composition et concentration minérales. Les teneurs pourront être assez et certains minerais pourront être directement traités par hydrométallurgie.

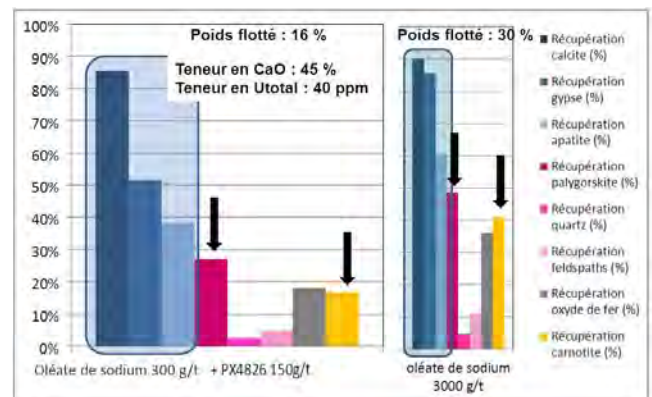


Figure 3 : taux de récupération de l'ensemble des minéraux de la calcrète de Trekkopje dans les flottés en utilisant de l'oléate de sodium seul ou en mélange avec un réactif non ionique PX4826 à pH 8.

La particularité des sulfures hydrothermaux est la présence de plusieurs petits métaux accompagnateurs (ex : Zn/Ge) et les flux d'hydrogène naturel. La taille des gisements est très variable (formation en grappes) allant de 0,5 Mt à 100 Mt. La valeur brute du minerai est élevée à très élevée (500 à 2000 \$ /t). Les technologies d'exploitation sont connues par segment, les procédés d'extraction sont en cours de développement/validation. Cependant, les modalités de stockage et le traitement du minerai nécessitent des études spécifiques.

Position du problème

Les études préparatoires à une possible exploitation de ressources minérales sulfurées volcanogènes à partir de leur lieu de formation sous-marin plus ou moins récent montrent de toute évidence que, si la

minéralogie primaire des amas est maintenant bien établie, une altération rapide des minéraux est possible même en milieu marin profond très peu oxygéné. Les assemblages minéralogiques, leur texture et leur granulométrie, liés au mode de mise place, ainsi que la nature du milieu aqueux sont autant de facteurs qui jouent un rôle dans cette altération. Les premières observations microscopiques sur les échantillons frais laissent supposer un rôle éventuel de l'activité bactérienne dans la « mise en place/altération » des minéraux sulfurés. Ce phénomène pourra devenir un paramètre important si les minerais sont en contact avec les échantillons terrestres.

Il est donc nécessaire d'étudier la manière dont l'altération des minéraux peut se poursuivre tout au long d'une chaîne de mise en valeur de ces ressources, pouvant ainsi en affecter la faisabilité de valorisation.

Les résultats obtenus et l'objectif du travail

Les études minéralogiques et texturales ainsi que celles portant sur la flottabilité réalisées par l'Equipe Génie minéral du LEM (laboratoire GeoRessources depuis 01/01/2013) en collaboration avec Ifremer et Technip sur différents échantillons (douze au total) provenant de six campagnes en mer effectuées entre 1998 et 2008 montrent que les sulfures marins sont assez semblables aux sulfures continentaux (VMS, porphyres, skarns, MVT...). Cependant, des différences significatives ont été révélées :

- la dépression de la pyrite par le pH est très difficile à obtenir lorsqu'on flotte la chalcopyrite à partir d'un échantillon vieilli ou fraîchement broyé ;
- la flottation nécessite plus de réactifs ;
- l'oxydabilité des minéraux est très importante voire instantanée et influence très sensiblement le traitement : la flottabilité des échantillons et la quantité des réactifs utilisés changent en fonction du vieillissement.

L'objectif est de développer un procédé qui pourra être appliqué, ou du moins servir de base à la valorisation du minerai d'un gisement pilote qui se trouve dans le secteur Futuna.

Phytomine

En 2013, l'équipe pluridisciplinaire travaillant sur la phytomine des métaux a focalisé ses efforts dans le domaine de l'hydrométallurgie, en particulier sur les biomasses de plantes hyperaccumulatrices de métaux recueillies en phytomine.

Deux thèses de doctorat ont démarré à la rentrée 2013 :

- Ali KANSO, thèse dirigée par le LSE en co-tutelle avec l'Université Libanaise a commencé sa thèse sur

la phytoextraction d'éléments d'intérêts sur les déchets industriels contaminés en Lorraine ainsi que sur des sols pollués par l'industrie des phosphates au Liban. Cette thèse cible des éléments d'intérêt stratégique (Antimoine ou terres rares) dans l'optique d'une seconde mine permise par la phytomine. Certaines espèces hyperaccumulatrices de métaux ont des propriétés d'absorption générique qui pourraient permettre une concentration des éléments stratégiques dans les parties récoltables des plantes. Pour l'instant, une caractérisation des déchets industriels riches en éléments d'intérêts est en cours puis des cultures en conditions contrôlées et en parcelles de terrain seront mise en œuvre rapidement au cours de l'année 2014.

- Marie RUE, thèse co-dirigée entre le LSE et le LRGP : Processus de mobilisation/immobilisation des métaux dans un agrosystème construit pour la valorisation de la biomasse. Cette thèse est financée par le projet lorrain LORVER (AME Région Lorraine). Elle est en interface directe avec la phytomine des métaux d'intérêt. L'objectif de la thèse est de contribuer au développement d'un service d'approvisionnement en métaux en optimisant la phytoextraction à partir de matrices contaminées (sols, déchets, sédiments). Ainsi, il s'agit de créer les conditions pour la production d'une biomasse concentrée en métaux d'intérêt industriel, sans engendrer de phénomènes de contamination des écosystèmes adjacents. La thèse s'attachera à développer les connaissances sur le comportement de plantes hyperaccumulatrices sur des matrices potentiellement toxiques, et sur leurs effets sur les processus de solubilisation et d'insolubilisation dans la rhizosphère. Les plantes seront sélectionnées pour leurs performances en matière de phytoextraction et leur capacité à se développer sur les matrices contaminées.

Ces travaux bénéficient de collaborations avec les organismes de recherche suivants : INRS-ETE (Québec, Canada) ; Université Agricole de Tirana (Albanie) et Institut Technologique -TEIKAV- de Kavala (Drama, Grèce).

Résultats

Les résultats concernent toute la filière scientifique autour de la phytomine. Depuis la recherche géobotanique de nouvelles espèces ou de nouveaux taxons d'hyperaccumulateurs jusqu'à l'agronomie et les procédés métallurgiques de récupération et de synthèse de produits valorisant ces biogisements.

Inventaire des espèces hyperaccumulatrices d'intérêt dans les Balkans

L'Europe méditerranéenne est connue comme l'un des principaux domaines de la diversité de métallophytes dans le monde entier, en particulier dans la péninsule balkanique. Les membres de l'équipe Phytomine ont entamé le recensement des

potentialités phénotypiques d'hyperaccumulateurs de Ni depuis plusieurs années sur l'Albanie, La Grèce continentale et la Bulgarie (Bani et al., 2009; 2010; 2013).

Les plantes hyperaccumulatrices de Ni identifiées ont été prélevées dans des contextes différents (paramètres édaphiques) de manière à disposer de la plus grande diversité génétique possible. Les espèces prélevées en Albanie et en Grèce continentale (2011-2013) comprennent *Alyssum bertolonii*, *A. heldreichii*, *A. markgrafii*, *A. murale*, *A. smolikanum*, *Noccaea goesingense*, *N. Ochroleuca*, *N. tymphaea*, *Bornmuellera baldaccii*, *B. tymphaea*, *Centaurea thracica* (Asteraceae), *Leptoplax emarginata*. Une nouvelle espèce de *Centaurea* hyperaccumulatrice (détermination en cours) a également été identifiée sur l'île d'Eubée en juillet 2013 (Figure 1).

Interaction plantes – bactéries dans la rhizosphère des plantes hyperaccumulatrices

La diversité du couvert végétal engendre une diversité biochimique des composés exsudés (rhizodéposés) qui a tendance à favoriser la prolifération de la microflore. Cela peut favoriser certaines fonctions microbiennes. Par exemple la production de composés auxiniques et l'ACC-déaminase qui, respectivement, stimulent la croissance végétale et limitent le stress oxydatif provoqué par les métaux résultant en synthèse d'éthylène chez la plante.



Figure 1 : Deux espèces hyperaccumulatrices de *Centaurea* sont maintenant attestées en Europe. Ces plantes ont un comportement très différent des Brassicacées habituellement utilisées en phytomine.

Si ces effets étaient provoqués par l'exsudation de ces plantes, ils provoqueraient une stimulation de la croissance des plantes et donc de l'efficacité de phytoextraction du couvert végétal. Quatre plantes hyperaccumulatrices provenant du Nord de la Grèce (sols ultramafiques des Monts Pindes) ainsi qu'un sol ultramafique n'ayant jamais accueilli de plantes hyperaccumulatrices (Col des Bagenelles) ont été utilisés dans des cultures simples ou croisées en chambre de culture. Les résultats (Figure 2) montrent un effet du couvert mixte mitigé du fait d'une éventuelle compétition entre espèces (pas de synergie). Contrairement aux hypothèses de départ, l'efficacité d'extraction du Ni non supérieure sous couvert mixte : mixte.

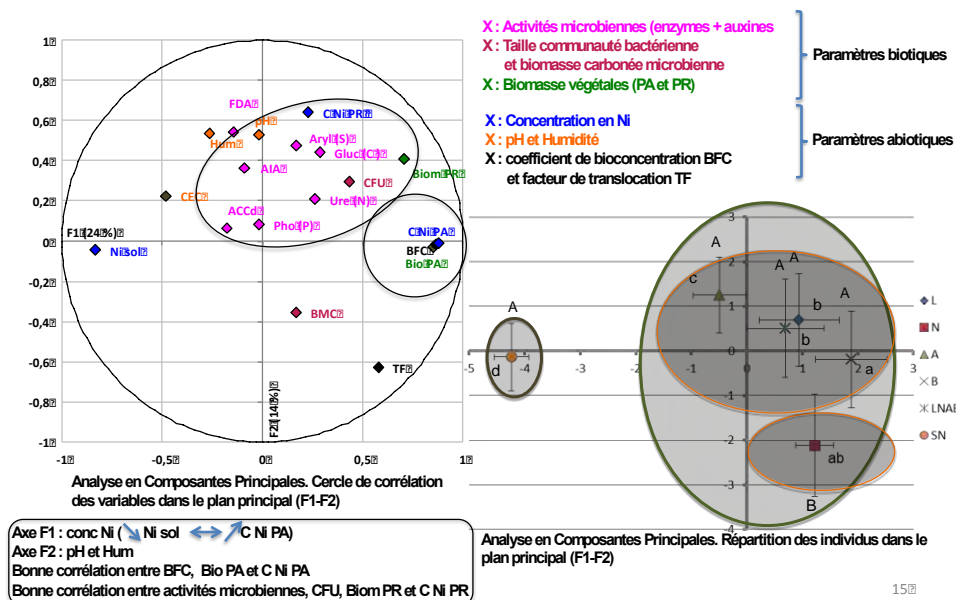


Figure 2 : résultats en Analyse des Composantes Principales des fonctions écologiques microbiennes et des propriétés du sol en fonction des couverts de plantes hyperaccumulatrices

Le couple *Bornmuellera tymphaea* et *Noccaea tymphaea* semble être le couple le plus efficace. Des prélèvements des terres où ces deux plantes poussent simultanément ont été réalisés en juillet 2013 de manière à isoler des bactéries résistantes au Ni qui seront inoculées dans les mêmes conditions de culture que 2013.

Optimisation des étapes du procédé de récupération du Ni de biomasses

La thèse de Xin ZHANG (co-dirigée entre le LSE et le LRGP) a permis de sélectionner les espèces d'intérêt futur pour la phytomine (Zhang et al., 2014). Certaines espèces comme *Leptoplax emarginata* méritent d'être cultivées au champ car elles contiennent 2 à trois fois plus de Ni (jusqu'à 3,5% dans les feuilles en MS) et deux fois moins de Ca qu'*Alyssum murale*. Elle a aussi permis de continuer d'optimiser les étapes de la récupération de Ni à partir de biomasses d'hyperaccumulateur de Ni, *A. murale*. Les points importants sont : i) limiter l'énergie nécessaire pour la combustion des biomasses (optimisation de la durée et de la température pour récupération du Ni : Zhang et al., 2014), ii) optimiser les températures et le nombre de lavages acides (H₂SO₄), caractérisation des phases amorphes et cristallisées à chaque étape du processus (DRX, MEB-EDX), iii) inverser les étapes de cristallisation-purification pour obtenir le sel double Ni(NH₄)₂(SO₄)₂ · 6H₂O dans le but de réduire les consommations d'intrants et la production d'effluents. Le degré de pureté des sels obtenus doit être supérieur à 99% pour une valorisation économique.



Figure 3 : cristaux de Ni(NH₄)₂(SO₄)₂ · 6H₂O produits après optimisation des étapes de purification (Photo X. Zhang).

Mise en place d'un pilote de laboratoire pour réaliser le procédé breveté de synthèse de sel double à partir des biomasses

Dans le cadre de ce projet, une unité de production du sel double de nickel a été développée. Après la phase d'étude et de conception, une démarche de négociation a été entamée auprès de fournisseurs afin d'acquérir le matériel nécessaire à la réalisation de cette unité. Actuellement, tous les matériaux, équipements et accessoires nécessaires à ce dessein sont arrivés et en cours de montage. Le montage de cette installation est en cours d'achèvement et des tests de validation seront effectués dès le début janvier 2014. L'unité de production se divise en trois parties : une partie utile au traitement des cendres afin de la laver et éliminer une partie des éléments chimiques non utiles au procédé. Les rejets de cette étape sont essentiellement du potassium qui pourrait être valorisé sous forme d'engrais liquide pour amender les sols. La seconde partie est relative à l'extraction du nickel depuis les cendres. Cette étape permet également de séparer le nickel d'autres éléments chimiques tels que le fer et le magnésium. Enfin, la dernière partie est constituée d'un cristalliseur afin d'obtenir le sel double et le purifier.

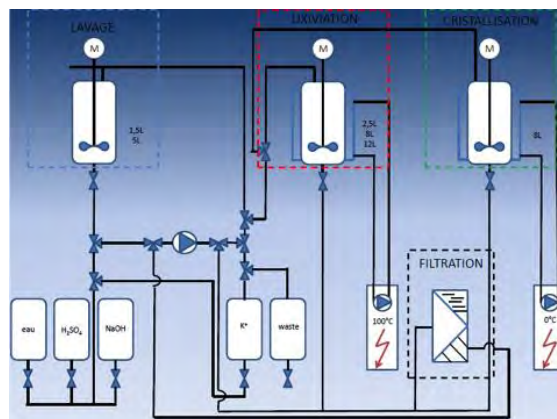


Figure 4 : schéma du procédé pilote de synthèse de sel double de Ni à partir de cendres de plantes hyperaccumulatrices

En parallèle au développement de l'unité de production du sel double, un protocole de pré-traitement de la matière première contenant le nickel a été développé en collaboration avec le groupe GISFI, la station STEVAL et le LERMAB. Dans le procédé de production du sel double de nickel, les matières premières sont des cendres de plantes hyperaccumulatrices. Or, actuellement, nous

recevons les plantes hyper-accumulatrices d'Albanie en l'état, sèches, non broyées et non incinérées. Nous devons donc assurer nous-même ces étapes. Le broyage des plantes sera réalisé, à grande échelle, à la station STEVAL. Pour cela, une trémie d'alimentation d'un broyeur de carton a été développée, conçue et montée. A ce jour, il nous est possible de réaliser facilement et dans un délai respectable le broyage de l'intégralité des plantes - à savoir 1700 kg.

L'incinération des plantes broyées sera réalisée au LERMAB (Epinal). Mais nous sommes confrontés à un détail technique au niveau des chaudières semi-industrielles du LERMAB ; celles-ci ne fonctionnent qu'avec des granulés. Une étape de granulation des plantes est donc nécessaire et en cours de développement à ce jour avec la collaboration de Yann ROGAUME et Matthieu DEBAL. Cette étape est très délicate car elle échoue si le taux

d'humidité n'est pas optimal dans les plantes broyées. Actuellement, nous pensons utiliser une chambre climatique pour obtenir l'humidité voulue de manière uniforme. Des tests ont été réalisés et sont encourageant car à ce jour, environ plus ou moins 60kg de plantes broyées sont sous forme de granulé. Lorsque nous aurons environ 150 à 200 kg de granulés, nous commencerons l'étape d'incinération. Une nouvelle méthode, plus rapide, est en cours de développement afin d'éviter les phases coûteuses en termes de temps que sont le broyage et la granulation. Pour cela, une chaudière type « tube à cigarette » est actuellement en étude afin d'utiliser les plantes telles qu'elles nous parviennent, c'est à dire non broyées. Le matériel est acquis, la chaudière est construite et des seront réalisés dans les jours à venir. Si ce développement est concluant, alors nous abandonnerons définitivement les étapes de traitement actuellement suivies.

Impact environnemental - PRA3

Laure GIAMBERINI et Corinne LEYVAL

L'extraction des métaux stratégiques, leurs utilisations exponentielles dans différents secteurs d'activités industrielles et la production de déchets associés soulèvent de nouvelles questions liées à leur impact potentiel sur la santé humaine et l'environnement. Comme beaucoup d'autres contaminants d'origine anthropique, les métaux peuvent être diffusés dans les écosystèmes à différentes distances de leurs sources, où ils peuvent avoir des effets néfastes sur les organismes vivants. Il s'agit donc de mieux comprendre le comportement et les effets de certains de ces métaux qui sont très peu ou pas connus.

Les travaux reportés dans le présent document concernent non seulement les actions directement financées dans le cadre du programme des recherches du Labex RESSOURCES21 mais aussi émanant des thématiques déjà fortement implantées au sein des laboratoires participants et concernant l'écodynamique des métaux stratégiques (sous forme dissoute ou nanoparticulaire) dans l'environnement et l'évaluation de leurs effets à différents niveaux d'organisation biologique.

Ecodynamique des métaux stratégiques

Les propriétés physico-chimiques aux interphases naturelles contrôlent de nombreux processus environnementaux tels que le piégeage de contaminants (métalliques, organiques, nanoparticulaires) ou encore leur biodisponibilité. La détermination des paramètres clés et des temps caractéristiques qui décrivent la formation des complexes permettent de mieux prédire le transfert réactif des contaminants et leur disponibilité vis-à-vis d'un microorganisme

L'un des objectifs de nos travaux est donc d'approfondir les connaissances sur les relations existant entre les propriétés électrohydrodynamiques d'interphases colloïdales et leur réactivité vis-à-vis d'ions métalliques.

Par une approche **expérimentale et théorique** dans le cadre d'un projet intitulé « *Dynamique des processus réactifs entre systèmes bactériens et métaux lourds* » soutenu par la Région Lorraine et l'Université de Lorraine (porteur, E Rotureau), nous examinons la dynamique de spéciation de métaux dans des suspensions colloïdales (particules cœur-couronne, microgels ou particules minérales) en déterminant les processus couplés de cinétique de complexation et de transport au sein et/ou à l'extérieur de l'interphase réactive. Actuellement, les

techniques électroanalytiques qui sont employées pour de telles études sont limitées à une gamme assez restreinte de métaux traces tels que le Pb, Cd, Cu, Zn, In. Nous souhaitons donc généraliser ces approches expérimentales vers d'autres familles de contaminants comme les terres rares et de façon plus générale, vers les métaux trivalents. Le développement de techniques de spéciation de ces espèces chimiques constitue un premier défi car il n'existe pas, à notre connaissance, d'outils électroanalytiques qui permettent d'analyser leur spéciation dynamique en solution. Les objectifs principaux du projet qui débutera en 2014 dans le cadre du Labex RESSOURCES21 (*Trivalent metal cations speciation in natural water*) sont donc i) d'explorer les possibilités des techniques électroanalytiques et les concepts qui y sont associés pour l'analyse de la spéciation de métaux trivalents en solution (terres rares et platinoïdes) et ii) d'étudier le comportement en solution d'un métal trivalent modèle (Indium) en présence de matières organiques.

Les études menées en **conditions naturelles** sur la rivière de la Fensch drainant historiquement les activités sidérurgiques de la vallée (*Aquatic pollution in the vicinity of past steel making facilities, the case of the Fensch river*, Montargès-Pelletier *et al.* 2013) ont permis de caractériser dans l'eau, les matières en suspension et les sédiments, des particules et colloïdes riches en fer fortement chargés en éléments métalliques (Zn, Cr, Pb, Cu, Ni, As) dont les variations sont expliquées par les entrants externes. Le Pb, Cu, Mn ont tendance à se concentrer dans les matières en suspension alors que le Cr et As suivent les variations du Fe et se concentrent dans les sédiments aval de la rivière près de la confluence avec la Moselle. Le zinc est fortement lié aux particules riches en fer qui se traduit par une diminution des concentrations à l'aval. Sur le linéaire de la Fensch, la compartimentalisation des métaux entre l'eau et les phases particulaires est accompagnée de fortes modifications de la nature et de la minéralogie des particules riches en fer. Les différentes techniques de spectroscopie et de microanalyses de RX et d'ICP-MS ont permis d'établir un processus de la partition du zinc en trois étapes : sédimentation, altération, resuspension, au cours desquelles les particules riches en fer subissent des modifications minéralogiques passant d'oxydes ferreux à des oxy-

hydroxides de fer. Les réductions des teneurs en zinc en solution sont associées avec des valeurs de pH variant entre 7.74 et 7.94, de fortes concentrations en matières en suspension et en carbone organique.

Nota. Les résultats du travail postdoctoral de Asfaw ZEGEYE concernant le développement de nouveaux biosenseurs bactériens pour la surveillance *in situ* du statut chimique et physique de métaux stratégiques et de leur (bio)disponibilité sont présentés dans le cadre de l'Action PRA6.

Ecotoxicité des métaux stratégiques

Lanthanides

La revue bibliographique réalisée sur le devenir et les effets des **lanthanides** a mis en évidence le manque de connaissances générales concernant leur toxicité. En effet, si les propriétés atomiques de ce groupe sont utilisées pour une première approche prédictive de leur toxicité, aucune cohérence n'a pu être apportée concernant leur écotoxicité dont l'origine pourrait être la non prise en compte de la spéciation des éléments métalliques dans les milieux de culture à l'origine d'une sous-estimation de leur toxicité. Elle a mis aussi en évidence le besoin d'études à des niveaux moléculaires qui permettraient de montrer un éventuel mode d'action toxique commun à ce groupe de métaux.

Dans le cadre de la deuxième année du travail postdoctoral de Veronica Gonzales, l'écotoxicité de trois lanthanides : Cerium (Ce, terre rare légère), Lutetium (Lu, terre rare lourde), et Gadolinium (Gd, intermédiaire) a été testée sur plusieurs espèces de crustacés aquatiques (*Daphnia magna* & *Heterocypris incongruens*), de rotifères (*Brachionus calyciflorus*), d'hydres (*Hydra attenuata*), d'algues (*Pseudokirchneriella subcapitata*), de bactéries (*Vibrio fischeri*) et aussi sur des complexes enzymatiques photosynthétiques (PECs). L'écotoxicité des lanthanides semble augmenter avec leur numéro atomique (Ce<Gd<Lu) mais révèle une variabilité interspécifique. La plus forte toxicité associée au plus haut numéro atomique n'est significative que chez les bactéries et les algues. Les crustacés sont les moins sensibles alors que les rotifères et les cnidaires montrent un comportement inverse. Afin de compléter cette approche, des expériences similaires sont actuellement conduites sur des espèces animales et végétales terrestres qui permettraient à terme d'établir un schéma général de l'écotoxicité des lanthanides indispensable à l'évaluation d'un risque environnemental pertinent.

Par ailleurs, dans le cadre de la thèse de M. Garaud soutenue par l'ANR P2N Mesonnet, *Utilisation de mésocosmes terrestres et aquatiques en réseau pour l'évaluation du risque associé à la dispersion de nanoparticules manufacturées* (NPs). (Porteur J.Y.

Bottero, Cerege, 2011 – 2014), d'autres espèces d'invertébrés comme les moules zébrées ayant un rôle fonctionnel important dans les écosystèmes aquatiques ont été utilisées pour évaluer les effets écotoxiques de deux types de nanoparticules manufacturées d'oxyde de **cerium** nues et enrobées (injections répétées progressives, concentration finale de 1 mg/l). Les expériences conduites en mésocosmes sous des conditions environnementales plus réalistes pendant un mois montrent que (i) les deux types de NPs affectent temporairement la structure des communautés bactériennes, (ii) les NPs enrobées affaiblissent les capacités immunitaires des bivalves sur l'ensemble de la période d'exposition (iii) l'effet est précoce et transitoire avec les NPs nues. Ces résultats sont en cohérence avec le comportement des deux NPs dans le milieu et leur facteur de bioaccumulation.

Ce sont aussi les effets écotoxicologiques et écophysologiques du Ce qui seront étudiés chez des bivalves le long d'un gradient salé dans le cadre de la thèse de C. Bertrand soutenue par l'ANR CESA, *Nanosalt, Exposition et effets écotoxicologiques de nanomatériaux et de leurs produits de dégradation en fonction d'un gradient de salinité*. (Porteur M. Auffan, Cerege, 2013-2016).

Avec une approche plus mécanistique, le programme mené par Marc Parant concernant les *risques biologiques directs associés à l'extraction de terres rares et à leur utilisation dans les produits manufacturés* a permis de suivre plus particulièrement l'impact d'agents de contraste au **gadolinium** couramment utilisés sur des cellules humaines en culture. Les cellules HEK 293T ont montré une sensibilité au Gd similaire à celle déjà décrite pour d'autres modèles cellulaires avec une IC₅₀ de 1,15 mM après 48h d'exposition aiguë. Par contre, aucun effet n'a pu être montré sur leur croissance. Toutefois, l'association qui a été observée entre ces cellules et le gadolinium après seulement 48h d'exposition à l'acide gadotérique suggère un caractère non inerte de ce composé mais dont aucun effet n'a pu à ce jour être mis en évidence.

Ce travail est actuellement poursuivi dans le cadre d'un programme EC2CO et de la thèse de Emilie Perrat, *Impacts environnementaux des agents de contraste au gadolinium : situation locale, approche cellulaire et in vivo*, cofinancée par le LabEx RESSOURCES21. L'élaboration du programme de thèse a également permis la mise en place d'une collaboration avec le laboratoire d'hydrologie de Nancy – ANSES et l'Institut de Chimie Moléculaire de Reims.

L'ensemble de ces recherches a permis au laboratoire LIEC d'acquérir des connaissances sur l'écotoxicité des terres rares et de (i) déposer en

octobre 2013 avec le Centre de Recherches Public Gabriel Lippman (Luxembourg) un projet international à l'ANR intitulé « *Rare Earth Elements Ecotoxicology in Aquatic Systems-REETOX* » (porteur Davide Vignati, LIEC) et de (ii) participer à un programme COST, NOTICE, *Network on Technology-Critical Elements – from Environmental Processes to Human Health Threats* (porteur, C. Garcia, Consejo Superior de Investigaciones Cientificas/Instituto de Investigaciones Marinas (Espagne, deuxième soumission en mars 2014).

Autres métaux stratégiques

Les effets de l'**argent** sont également une préoccupation des deux thèses de M. Garaud et de Jennifer Andréi (cofinancée par le LabEx RESSOURCES21) dans le cadre du programme Mesonnet.

Dans le cadre du premier sujet impliquant les moules zébrées, les objectifs des études étaient i) de tester les effets des nanoparticules d'argent (nAg) à de faibles doses, ii) d'observer une éventuelle modulation de cette toxicité avec le nourrissage (apports d'algues) et iii) de comparer la toxicité du nAg avec celle de l'argent soluble.

Les résultats montrent une toxicité significative des formes dissoutes et nanoparticulaires de l'argent sur les paramètres immunologiques des hémocytes de moules zébrées. Le nourrissage semble réduire la toxicité de l'argent. Cette moindre toxicité pourrait s'expliquer par i) une agrégation/adsorption des formes solubles et nanoparticulaires de l'argent sur ces algues et une sédimentation de celles-ci en diminuant la biodisponibilité et/ou ii) un meilleur état physiologique des moules nourries leur permettant une meilleure résistance au stress engendré par l'exposition à l'argent.

La réflexion associée à la thèse de Jennifer Andrei (Thèse cofinancé par le LabEx RESSOURCES21), est la compréhension des mécanismes biologiques qui permettent de faire le lien entre les phénomènes observés au niveau individuel chez trois espèces de gammare et ceux observés à des niveaux supérieurs. Cette thèse envisage donc d'établir un lien entre des aspects purement écotoxicologiques et une approche plus écologique dans le but de pouvoir répondre à la simple question : les NPs représentent-elles une vraie menace dans les écosystèmes d'eau douces ? Les expériences menées cette année se sont focalisées sur trois grands questionnements :

- les effets d'une contamination à l'argent sur les gammare sont assez bien connus. Sous forme nanoparticulaire, observe-t-on des effets similaires ?
- entre les voies de contamination directe et trophique, laquelle semble être la plus préoccupante?

- Face à une contamination aux NPs, existe-t-il des différences de réponses interspécifiques au sein du genre *gammarus* ?

Les expériences menées à court terme, montrent que parmi les réponses mesurées à différents niveaux biologiques, la locomotion des gammare est très impactée lors d'une contamination en argent dissous et nanoparticulaire. Au niveau fonctionnel, la mesure des performances de l'organisme à fragmenter la litière a été appréhendée par des études de consommation, production de particules fines de matière organique (FPOMs) et d'assimilation. La contamination semble augmenter l'assimilation des gammare en suivant un effet dose. Lorsque l'argent est sous forme nanoparticulaire, cet effet est amplifié. L'ensemble de ces résultats a mis en évidence une différence interspécifique de sensibilité aux deux formes d'argent.

Dans le cadre d'un programme EC2CO porté par Davide Vignati, *Insoluble elemental species in algal culture medium: a kinetic approach to their formation and ecotoxicological relevance*, l'objectif est d'étudier l'écotoxicité du **chrome** (III), mal caractérisé à cause de certains aspects de sa chimie qui, tout en étant bien connus par les chimistes, ont le plus souvent échappés aux écotoxicologues. En particulier, dans les conditions standardisées des tests en laboratoire, les sels solubles du Cr(III) utilisés pour en tester la toxicité chez les organismes forment rapidement des hydroxides très peu solubles. Ceci a deux conséquences pour l'étude de la toxicité du Cr(III) : i) les concentrations de Cr auxquelles les organismes sont exposés ne sont pas stables au cours du test ce qui peut amener à une sous-estimation de la toxicité du Cr(III); ii) les formes insolubles pourraient contribuer à la toxicité observée à travers un mécanisme d'action semblable à celui de nanoparticules. La première année du projet (2013) a déjà permis de confirmer la première hypothèse. La vérification de la seconde hypothèse, inscrite dans le programme de 2014, sera prise en charge dans le cadre de la thèse de Imad Aharchaou qui vient de débiter.

Frontières analytiques : nouvelles approches de traçage des fluides et des métaux et de géochronologie - PRA4

Laurie Reisberg et Christian France-Lanord

Objectifs

L'objectif du PRA4 est de développer des outils originaux qui apporteront de nouveaux niveaux d'information sur des aspects critiques en métallogénie (interactions eau-roche, origine des fluides porteurs) comme sur la dispersion et le devenir des métaux dans l'environnement. Il s'agit d'un axe qui fonctionne en étroite collaboration avec les autres axes, notamment le PRA1 et le PRA3. Les outils développés comprennent les fractionnements isotopiques dits "non traditionnels", dont ceux du Ni ou du Ge, qui peuvent apporter des contraintes sur la spéciation des métaux et ainsi sur leurs mécanismes de transport et de concentration lors des processus géologiques et biologiques. Nous travaillons également sur le développement de techniques de microanalyse, par LA-ICP-MS et par sonde ionique, ainsi que sur des méthodes de datation, comme la datation d'argiles par le système K-Ar.

Résultats et travaux en cours

Traçage des processus d'hyperaccumulation de Ni dans des systèmes sol-plantes

Il s'agit du sujet du projet post-doctoral de Nicolas Estrade, financé par le LabEx RESSOURCES21. Le projet visait à évaluer le fractionnement isotopique de Ni dans des systèmes sol ultramafique - plantes métallophytes afin de mieux comprendre les mécanismes du transfert du Ni du sol vers des plantes hyper accumulateurs. Pour ce faire, il était nécessaire de développer une méthode de mesure à haute précision du fractionnement isotopique du Ni dans des échantillons biologiques et géologiques. Ces travaux comprenaient à la fois la mise en place d'un procédé de purification du Ni et le développement de la mesure (par MC-ICP-MS) à haute précision des isotopes du Ni dans les matrices environnementales.

La réussite de ces travaux a permis l'obtention des premières données au niveau international sur la composition isotopique du Ni dans les systèmes sol-plante. Notamment, ils ont montré un fractionnement des isotopes du Ni dans les sols et dans différentes parties de la plante d'une amplitude totale d'environ 1,2 ‰, par rapport à une composition isotopique des roches variant de 0 à 0,3 ‰. Dans la plante, l'enrichissement en isotopes légers serait dû au faible flux de translocation. L'absence de fractionnement dans les parties aériennes de

certaines plantes, des hyper accumulateurs à un stade phénologique avancé, serait la conséquence d'un très fort flux de translocation. Dans les sols, l'enrichissement en isotopes légers serait proportionnel à l'intensité de l'altération des minéraux primaires. Des mesures de fractionnement du Ni échangeable en cours devraient apporter des informations sur les mécanismes de fractionnement dans les sols et dans les racines.

La nouvelle méthode d'analyse isotopique du Ni mise au point lors de cette étude sera utilisable dans le cadre de futurs projets, notamment du plan d'action pluriannuel 2014-2018.

Les travaux ont été présentés dans deux conférences internationales.

- EnvironMetal Isotopes 2013, 18-23 août 2013, Ascona, Suisse (présentation orale).
- Goldschmidt Conference, 25-30 août 2013, Florence, Italie (affiche).

Un article dans une revue à comité de lecture international est en cours de rédaction.

Installation d'un spectromètre de masse K-Ar pour permettre la datation d'argiles

Un des projets importants du LabEx RESSOURCES21 est de créer un nouveau laboratoire de datation par la méthode potassium-argon (K-Ar). Le dispositif est en cours de montage sur financement du LabEx RESSOURCES21, du laboratoire GeoRessources, de l'ICEEL et du CREGU. Il s'agit de mettre en place la datation K-Ar des minéraux par un spectromètre à gaz couplé à une ligne de préparation-extraction. Cette technique est en soit éprouvée, mais elle sera ici appliquée sur des fractions minérales fines d'argiles. C'est l'acquisition de la méthodologie spécifique à ces phases qui représente le challenge analytique. Cette approche permettra d'accéder à des informations géochronologiques essentielles en métallogénie, et en diagenèse des bassins. La méthode potassium - argon permet, par application de l'équation géochronologique, de dater des événements de quelques milliards d'années à plusieurs milliers d'années. L'avantage de la méthode K-Ar est de permettre de calculer, en principe, un âge sur une seule mesure (roche totale ou minéraux), à condition que le système soit resté clos et qu'il n'y ait eu ni pertes ni excès d'argon au cours du temps.

L'ensemble des équipements comprend :

- les méthodes d'extraction des argiles (dislocation des roches sans création de fines de phyllosilicates hérités et radiogéniques par cycle de cryogénie, extraction par décantation et ultracentrifugation) ;
- un dispositif de calibrage qui permet de mêler aux gaz sortant du four la quantité exactement connue du traceur (spike) ; un dispositif de purification qui piègera la totalité des composants du mélange issu du four autres que les gaz rares (ligne d'extraction-purification) ;
- un dispositif de mesure comprenant le spectromètre de masse et sa ligne d'introduction ; un dispositif d'extraction composé essentiellement d'un four.

Le spectromètre Thermofisher Argus a été testé au CRPG et installé en mai 2013 au laboratoire GeoRessources. La ligne de gaz est en cours de conception et de montage. Le montage sera finalisé en début 2014.

Prospectives

La jouvence de la sonde ionique Cameca 1270 du CRPG est prévue pour la période de mars à mai 2014. Le LabEx RESSOURCES21 a fourni une partie importante du financement (200 k€) requis pour cette modernisation, qui transformera l'instrument en l'équivalent d'une sonde ionique 1280 de la nouvelle génération. Cette transformation, qui comprendra le remplacement complet de l'électronique ainsi que du système de pompage, permettra une amélioration nette de la résolution spatiale et massique de la sonde. Elle ouvrira ainsi de nombreuses possibilités, comme la datation *in situ* par des méthodes K-Ca et Rb-Sr, et l'analyse et l'imagerie des métaux à très fine échelle.

D'autres projets en prospective s'inscrivent dans un avenir proche :

- 2014 - 2015 -Développement de la micro-analyse des isotopes stables H et C des inclusions fluides - Master et thèse.
- 2015 -Développement du couplage Laser-MC-ICPMS pour l'analyse isotopique à l'échelle minérale.

Modéliser la géométrie, le transport et les processus physico-chimiques en 3D aux échelles régionales – PRA5

Fabrice GOLFIER et Guillaume CAUMON

Introduction

Les enjeux de la recherche sur les gisements métalliques se sont largement déplacés par rapport à la vision que l'on pouvait en avoir il y a seulement une trentaine d'années. L'effort à mener est maintenant axé sur la caractérisation des « systèmes métallogéniques », c'est-à-dire de mieux comprendre la chaîne source-extraction-transport-piégeage-préservation et d'en établir l'emprise spatiale et temporelle. Comme l'ont montré les pétroliers, pionniers en ce domaine, cette démarche est la clé de la découverte de ressources nouvelles, qu'elles soient conventionnelles et situées à des profondeurs toujours plus grandes, ou qu'elles soient non-conventionnelles (teneurs faibles, métaux stratégiques encore mal connus du point de vue de leur métallogénie).

Afin de répondre à ces défis et d'accéder à une meilleure connaissance de la répartition des ressources à l'échelle du gisement ou de la province à partir d'observations parcellaires, la modélisation s'impose comme un outil incontournable d'intégration quantitative. L'objectif final consiste à décrire aux échelles régionales les processus de transfert/dépôt afin de proposer de nouveaux développements dans la représentation 3D des objets géologiques intégrant la modélisation des transferts de masse et de chaleur. En effet, le transfert des fluides minéralisateurs à l'échelle régionale est fortement contraint par des processus géochimiques (altération, minéralisation voire dégradation biotique pour les black shales), thermiques et mécaniques (échange matrice/réseau de fractures, impact des contraintes mécaniques). Une modélisation rigoureuse du transport des métaux par les phases fluides et des processus de dépôt associés nécessite de tenir compte de l'ensemble de ces mécanismes fortement couplés (couplage THMC) depuis l'échelle du pore jusqu'à celle du site d'étude. A cette difficulté, vient s'ajouter un deuxième enjeu lié à la description tridimensionnelle de la zone étudiée : comment caractériser correctement le réseau poral, ses hétérogénéités, ses propriétés minéralogiques et de surface ? Comment décrire rigoureusement les structures géologiques ductiles et cassantes aux échelles macroscopiques et régionales ? Comment relier de telles descriptions de dimensions très différentes ?

La démarche adoptée par les participants de l'action PRA5 s'appuie sur un effort croissant de synergie et de collaborations croisées entre les différentes équipes du LabEx RESSOURCES21 autour de la géomodélisation, de l'hydrodynamique, des processus de transfert ainsi que de la mécanique des roches afin de réussir à intégrer la majeure partie des mécanismes qui contraignent les processus de dépôt dans un modèle 3D. Ce travail nécessite, pour répondre aux défis soulevés, aussi bien le développement de nouveaux outils théoriques (développement de méthodes multi-échelles, prise en compte des hétérogénéités et de la dynamique de failles, caractérisation des incertitudes...) et techniques (mise en œuvre informatique) que l'application de méthodes connues (en particulier dans le domaine pétrolier) mais encore peu usitées pour des problématiques minières (e.g., géomodèle 3D des gisements, modélisation couplée pour le comportement hydromécanique, ...).

Ces travaux sont menés en étroite concertation avec l'axe PRA1 « Genèse des concentrations minérales » qui fournit l'ensemble des données géochimiques et géologiques nécessaires afin de réussir à contraindre les modèles.

Principaux résultats

Les différentes actions menées au cours de l'année 2013 dans le cadre du volet Modélisation du LabEx RESSOURCES21 s'articulent autour des thématiques suivantes :

Modélisation du comportement hydrogéomécanique d'un réseau de failles sous l'effet des variations de l'état de contrainte (Thèse LabEx-Région, 2012-2015 – Maxime Faivre)

Les gisements métallifères liés aux enrichissements supergènes (e.g., le nickel) sous l'effet de l'altération et du lessivage des roches ultramafiques, sont fortement contraints par le développement et l'extension du réseau de fractures préexistant. En effet, ces fractures jouent un rôle essentiel dans le processus de minéralisation à la fois en facilitant le lessivage de la péridodite mais aussi en contribuant à la concentration du nickel par l'augmentation de l'espace poral et la remobilisation des phases minérales nickélifères préalablement formées. L'influence de ces processus de fracturation active sur la formation des gisements et le couplage avec la circulation des fluides reste toutefois encore très mal compris. Or, l'évolution temporelle d'un réseau de

fractures (initiation de nouvelles fractures, jonctions de fractures initialement non communicantes, refermeture - colmatage de certaines fractures) et la prise en compte de ces effets d'historicité dans des modèles régionaux constituent encore à l'heure actuelle un défi scientifique majeur d'un point de vue de la modélisation numérique.

Durant cette première année de thèse, le travail réalisé, à la fois d'un point de vue numérique et théorique, a porté sur le développement d'un nouveau type d'élément fini hydro-mécanique couplé avec la méthode des éléments finis étendue (XFEM). L'objectif est de pouvoir intégrer directement les discontinuités (i.e., les failles ou fractures) au niveau de l'expression des équations de conservation discrétisée aux nœuds, évitant ainsi l'étape de remaillage liée à l'évolution de la géométrie du réservoir. Le développement numérique effectué sous *Code_Aster* (coll. LAMSID) est en cours et le couplage avec la partie écoulement devrait être terminé et validé courant 2014 (trois communications dans des congrès internationaux et la soumission d'une première publication sont prévus en 2014 sur ces aspects). Le couplage avec la partie transport de soluté et modèle réactionnel (couplage séquentiel avec un code géochimique) fera l'objet du travail de la dernière année de thèse. Notons qu'une seconde thèse (financement IFPEN, Bertrand Paul) a démarré en 2013 autour du développement de ces approches HM-XFEM. Bien que l'application visée soit différente, les développements prévus autour du modèle (extension au 3D, prise en compte de l'initiation de la fracturation) devraient bénéficier aux problématiques du LabEx RESSOURCES21.

Ecoulements réactifs en fracture et modélisation des processus d'altération de la péridotite

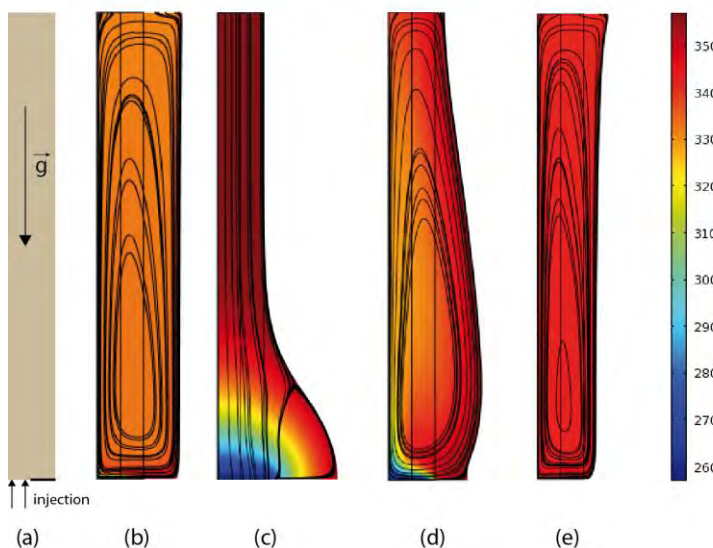


Figure 1. Evolution de l'altération d'une fracture isolée et du champ de concentration associé sous différentes conditions hydrodynamiques (Oltéan et al., 2013)

Le transport et la dissolution de minéraux intervenant durant l'écoulement de fluides dans des réseaux de fractures peuvent influencer le comportement hydrodynamique à l'échelle du gisement. Sur des échelles de temps géologiques, ces mécanismes d'altération et de dépôt peuvent conduire à une modification du réseau de failles proprement dit (élargissement - colmatage, ouverture de nouvelles fractures ...) et des valeurs locales de porosité et perméabilité. Une partie des travaux menés en 2013 dans le cadre de cette thématique ont porté sur la caractérisation des processus de couplage entre hydrodynamique et phénomène d'altération dans le cas d'écoulement en fracture en présence d'effet gravitaire. Les résultats expérimentaux et numériques obtenus (Oltéan et al., 2013) devraient contribuer à une meilleure prise en compte de ces mécanismes à l'échelle du réservoir. Les mécanismes de piégeage des particules transportées sous l'effet de la circulation des fluides dans les fractures, à l'origine des processus de sédimentation et de dépôt, ont aussi été mis en évidence et caractérisés (Nizkaya et al., 2014). D'autre part, des travaux préliminaires de modélisation de l'altération de la péridotite ont démarré en 2013 dans le cadre d'un projet de laboratoire avec des étudiants de 3^{ème} année de l'ENSG et devraient se poursuivre de manière plus approfondie en 2014 au travers du plan d'action 2014-2017 du LabEx RESSOURCES21.

Détermination des propriétés effectives des roches hétérogènes poreuses et fissurées

Les objectifs de ce projet sont de contribuer à une meilleure description géométrique des inclusions, pores, fissures dans les schémas et méthodes d'homogénéisation et de développer de nouveaux modèles micromécaniques pouvant à terme être intégrés dans les modèles 3D régionaux. La détermination des propriétés effectives, en particulier les propriétés élastiques et de conduction (conduction thermique, électrique) de roches hétérogènes, poreuses et fissurées reste en effet un sujet complexe et encore très ouvert, essentiel pour la modélisation des processus minéralisateurs mais aussi pour l'interprétation de données d'exploration géophysique. Par rapport aux travaux récents menés dans le domaine, deux complexités supplémentaires sont intégrées dans la description des pores et des fissures : leur caractère multi-échelle et leur forme pouvant être diverses. Les outils théoriques et numériques développés ici sont généraux peuvent s'appliquer à des échelles différentes, de la fracture à l'échelle du gisement à une microfissure à l'échelle micrométrique, par exemple. Les travaux réalisés ont été menés dans le cadre de l'accueil du professeur Igor Sevostianov (New Mexico State University, NMSU) sur la période de juin-juillet 2012 (cf. Fiche

action associée). Les développements théoriques et numériques réalisés ont donné lieu à trois publications dans des revues internationales (Sevostianov and Giraud, 2012, 2013 ; Giraud and Sevostianov, 2013) et contribué aux renforcements des collaborations entre l'Université de Lorraine (UdL, Albert Giraud, GeoRessources) et New Mexico State University (NMSU, Igor Sevostianov) sur cette problématique. Cette collaboration s'est concrétisée par le financement d'un projet européen intitulé « *Trans-Atlantic Micromechanics Evolving Research* » (TAMER - "Materials containing inhomogeneities of diverse physical properties, shapes and orientations", 10 universités partenaires dont UdL et NMSU, 1.2M euros sur 4 ans), dans le cadre de l'IRSES (International Research Staff Exchange Scheme) - Actions Marie Curie. A terme, la publication d'un livre de synthèse est prévue.

Géomodélisation 3D et application à différents gisements miniers

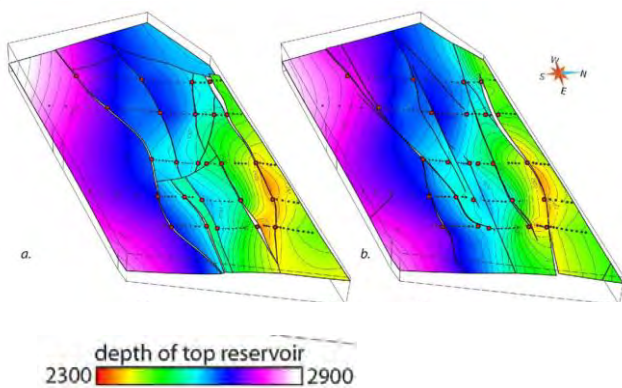


Figure 2. Exemple de modèles stochastiques structuraux (d'après Caumon et al., 2013)

Ces travaux concernent des développements méthodologiques financés par le Consortium Gocad. Les principales avancées réalisées récemment concernent la construction robuste de géomodèles à partir de données de surface (Caumon et al., 2013), l'utilisation de méthode paramétrique pour optimiser le déplacement 3D autour des failles (Gautier et al., 2013), l'optimisation des méthodes de remaillage des modèles structuraux 3D (Pellerin et al., 2013) et le développement d'approche permettant de capturer les incertitudes relatives aux structures par simulations stochastiques (Bonneau et al., 2013).

Enfin, des avancées concernant la restauration 3D de structures géologiques ont permis de prendre en compte les effets de compaction liés à l'enfouissement (Durand-Riard et al., 2012) et d'étudier l'influence des propriétés mécaniques du milieu sur les résultats de la restauration (Durand-Riard et al., 2013). A terme, ces développements méthodologiques auront pour but d'être utilisés dans le cadre des problématiques d'exploration des

ressources minérales. Ces méthodes de restauration 3D ont par exemple été utilisées dans le cadre du contrat européen PROMINE en partenariat avec de grands leaders miniers. L'application au gisement du Kupferschiefer (Pologne) a ainsi conduit à mieux comprendre les processus de minéralisation Cu-Ag et l'impact de la fracturation hydraulique sur les phases de remobilisation (Royer et al., 2013).

Conclusions et perspectives

Les travaux réalisés durant cette année ont conduit à des avancées significatives tant du point de vue du développement de géomodèles complexes et de la description des hétérogénéités que du couplage entre comportement hydrodynamique et géomécanique des milieux fracturés. L'action PRA5 a aussi été impliquée en 2013 au travers de J-J Royer (GeoRessources) dans le cadre du consortium européen ProMine (comprenant vingt-sept associés en provenance de onze États membres de l'Union Européenne) mené par le Geological Survey of Finland (GTK) et qui avait pour ambition de répondre aux questionnements de l'Union Européenne sur sa dépendance vis-à-vis des importations concernant les ressources minérales et les métaux. Différents géomodèles 3D de gisements miniers (Talvivaara mine, Finlande ; Kupferschiefer, Pologne) ont été réalisés en ce sens.

De nouvelles collaborations ont vu aussi le jour avec EDF et IFPEN autour de la problématique des écoulements en milieux fracturés et de la dynamique des fractures (thèse Bertrand Paul) et entre les Consortium Gocad et AMIRA pour mieux comprendre l'impact des incertitudes structurales en modélisation des gisements miniers.

Les perspectives pour 2014 concernent tout d'abord la modélisation des processus d'altération supergène conduisant aux processus de dépôt nickelifère. Le lancement d'une thèse est prévu autour de ces aspects, visant à coupler le modèle numérique hydrogéomécanique en cours de développement dans le cadre de la thèse de Maxime Faivre (2012-2015) à un code géochimique permettant de prendre en compte les cinétiques de réactions mises en jeu.

Les recherches méthodologiques du Consortium Gocad devraient aussi continuer autour de différents aspects essentiels pour les problématiques du LabEx RESSOURCES21 : prise en compte des processus cinématiques lors de la construction ou de la perturbation stochastique de modèles 3D (Laurent et al., 2013), génération de réseaux de fractures discrets combinant approche statistique rigoureuse et analogie avec les processus mécaniques de croissance des fractures (thèse de François Bonneau) et développement de maillages de type élément finis pour la simulation de processus couplés dans des géomodèles complexes (thèses de Jeanne Pellerin et Arnaud Botella, en collaboration avec Bruno Lévy de l'INRIA-Lorraine).

Capteurs Biogéochimiques –PRA6

Christian Mustin et Sophie Leguedois

Enjeux scientifiques et techniques

L'économie de la plupart des pays de l'Union européenne apparaît comme relativement dépendante de l'extérieur pour leurs approvisionnements en métaux, essentiels à la réalisation de produits manufacturés à haute valeur ajoutée (téléphonie, automobile, aéronautique...). Cette dépendance économique et géostratégique à l'égard de certains métaux (terres rares, Li, Sc, Sb, Ni...) force au développement, à moyen terme, de nouveaux procédés d'extraction ou de récupération des métaux et à l'exploitation de nouveaux gisements. Face à de tels enjeux, les risques de dérive et d'impact environnemental non contrôlé de ces nouvelles filières sont importants. Dans ce contexte hautement compétitif, comment gérer et prévoir les conséquences environnementales des opérations d'extraction et de valorisation de ces métaux ainsi que les effets écologiques à long terme engendrés par leur dissémination progressive ou brutale dans l'environnement?

L'approche proposée dans l'action PRA6 du LabEx RESSOURCES21 est de développer des méthodes d'analyses *in situ* non destructives et non invasives de la spéciation et de la disponibilité des métaux stratégiques dans des milieux réceptacles (eaux, sols) situés au droit des exploitations minières ou dans les rejets des procédés de valorisation. Il n'est pas question de concurrencer les sensibilités et les résolutions atteintes par les instruments de laboratoire (e.g. ICP-MS), mais de desserrer l'état normatif des approches analytiques classiques pour aller vers une vision plus systémique de la disponibilité des métaux. Dans le cadre proposé par la PRA6, la disponibilité chimique ou biologique n'est plus définie par un état physique ou chimique et quantifiable d'un métal, mais par la capacité d'un métal à interagir avec des corps organiques, minéraux ou biologiques présents dans le système. Ainsi, dans un contexte physico-chimique donné, un métal bio-disponible est un élément susceptible de traverser la paroi d'une cellule en un temps donné et induire une réponse cellulaire, e.g. activer la transcription d'un gène.

Les programmes mis en place en 2013

Depuis 2012, l'action PRA6 explore les possibilités d'évaluer la disponibilité et la mobilité des métaux dans des environnements miniers via des biosenseurs luminescents dont l'élément sensible est constitué de cellules bactériennes génétiquement modifiées (*Axe A2 : whole-cell biosensor*). Cette

action bénéficie, aujourd'hui, des avancées théoriques, expérimentales et analytiques réalisées dans le cadre des ANR Blanc HÆSPRI (2009-2013) et NanoZNOTox (2011-2014), à la fois dans les domaines de l'ingénierie génétique pour la construction de biosenseurs multicolores ou du traitement de signaux Raman ou de fluorescence complexes (*Axe A3*). En 2013, l'effort de recherche de la PRA6 a été concentré sur le développement de biosenseurs bactériens "metal-sensitive" plus ou moins spécifiques, capables d'identifier et doser, voire localiser *in situ*, directement des métaux de transition (Ni, Cd, Pb, Zn, ...) ou métalloïdes stratégiques (As, Sb, ...). Le développement de ces nouveaux biosenseurs comprend trois étapes :

- 1-la recherche de gènes "senseurs" sensibles aux métaux, *i.e.* codant pour des protéines ou enzymes impliqués dans l'homéostasie cellulaires
- 2-la modification génétique des bactéries par l'insertion au droit des régions régulatrices ou promoteurs de systèmes rapporteurs luminescents, *i.e.* codant la synthèse de molécules fluorescentes ou de substrats et d'enzymes de réactions chimioluminescentes,
- 3-la qualification "environnementale" du biosenseur, *i.e.* l'identification, par spectrométrie et traitement du signal, de la réponse des systèmes génétiques instrumentés à différents stress métalliques.

Grâce à ces constructions "senseur-rapporteur" intracellulaires, ces senseurs micrométriques, mobiles et autonomes, répondent uniquement à la fraction de métal pouvant diffuser à travers leur paroi cellulaire et activer la transcription d'un gène sensible. Cette réponse, en général croissante avec la quantité de métal internalisée indique la biodisponibilité du métal, au sens systémique définit précédemment. Le signal émis par un tel biosenseur est éminemment contingent, car l'écart entre fraction totale et fraction biodisponible peut être important, surtout pour des métaux hydrolysables, oxydo-réductibles ou peu solubles à pH neutre.

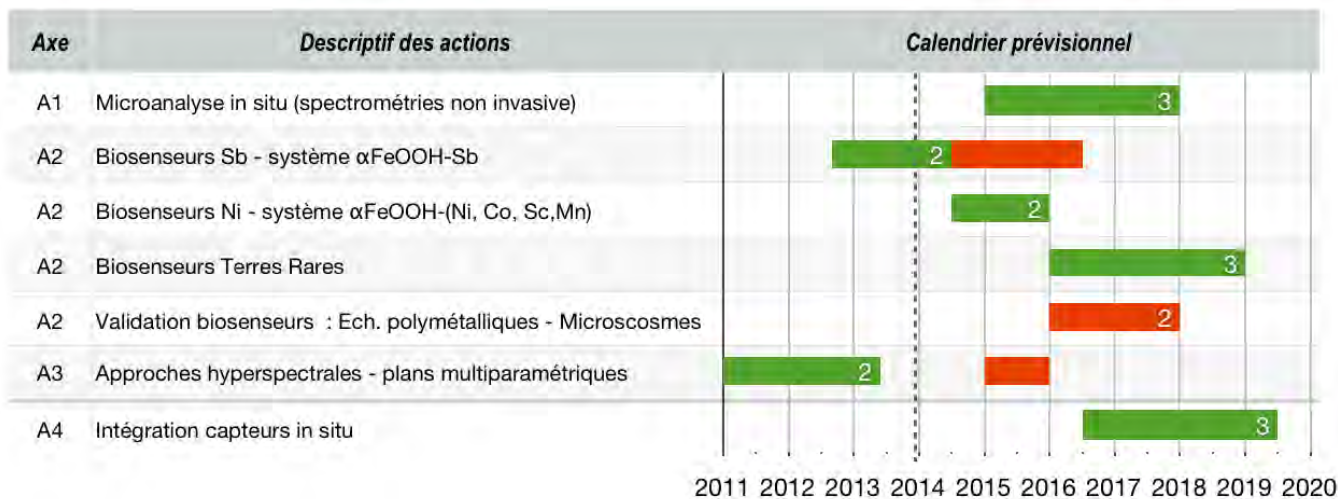


Diagramme de Gant de la PRA6 : Calendrier prévisionnel des actions échues, en cours ou futures au sein des différents axes de recherche (Ax) Les phases de conception (en vert) ou de validation (en rouge) des systèmes senseurs et des techniques de micro-analyses in situ y sont figurées

Durant les deux dernières années, une phase de conception et de validation de biosenseurs bactériens sur deux métaux stratégiques cibles : l'**antimoine** (Sb) et le **nickel** (Ni), a été entreprise. Ces deux métaux ont été retenus pour plusieurs raisons.

L'antimoine est fréquemment associé à l'arsenic dans les rejets et résidus de procédés de valorisation de minerais sulfurés aurifères, pour lesquels les concentrations en Sb(III) et Sb(V) excèdent souvent les seuils autorisés. Dans les sols neutres et alcalins, l'adsorption sur les surfaces des oxy-hydroxydes de fer contrôle largement la mobilité des oxyanions pentavalents $\text{Sb}(\text{OH})_6^-$ alors qu'en milieu acide, la mobilité de Sb^{III} dépend essentiellement des matières organiques solubles. Le nickel est fréquemment rencontré dans les Ferrasols ($\frac{1}{3}$ du territoire de la Nouvelle-Calédonie), des sols dérivés de roches ultrabasiques anormalement riches en métaux (Cr, Ni, Mn et Co). Dans ces latérites, la goethite (αFeOOH) est souvent considérée comme le constituant majoritaire et le principal vecteur du nickel (et du Cr), même si certains oxy-hydroxydes de manganèse (lithiophorite, asbolane) peuvent aussi contenir du nickel (et du Co).

Ainsi, dans les environnements miniers, la mobilité potentielle de l'antimoine et du nickel est sans doute fortement contrôlée par la réactivité de phases minérales de types oxy-hydroxydes de fer et par la distribution des minéraux métallifères dans une toposéquence (zones aérobie/anaérobie, drainées ou engorgées, riches en matières organiques...). Par conséquent, il est apparu intéressant de tester la réponse de biosenseurs et la biodisponibilité de métaux (Fe, Sb, Ni) sur des analogues synthétiques d'oxy-hydroxydes de fer substitués.

C'est dans cette perspective que l'action de recherche "Biosenseurs antimoine" a été menée et a reçu l'appui du post-doctorat de Asfaw Zegeye pour la validation de biosenseurs "antimoine-sensible" dans

des suspensions d'oxydes de fer antimoniés. Cette action sera poursuivie sur la période 2014-2016 par un programme inter-PRA sur l'antimoine; la robustesse des biosenseurs-Sb sera testée en présence d'échantillons de résidus miniers riches en antimoine (sites miniers du Massif Central) et dans des microcosmes "Résidus-Plante".

En phase avec l'action PRA3, un projet "Biosenseurs Nickel" et métaux associés (Co, Sc, Mn, Fe) a débuté et reprendra un cheminement similaire. Depuis novembre 2013, une étude de faisabilité sur une série de biosenseurs bactériens sensibles au nickel disponible au LIEC est en cours. Le recrutement de Asfaw Zegeye au CNRS, sur un programme de recherche focalisé en partie sur l'étude de la "Dynamique et nature de la (bio)disponibilité des métaux traces dans des systèmes géomicrobiens via l'utilisation et développement de «active whole cell biosensors», contribue à la pérennité de cette action de recherche. L'axe orienté vers le développement de micro-spectroscopies de fluorescence ou Raman (axe A1) miniaturisées utilisant des fibres optiques, est, pour l'instant, en stand-by. Des contacts ont été pris (en novembre 2013) avec un fabricant de spectromètre pour la mise en place d'un projet R&D sur un transducteur optique portable utilisable en fluorescence synchrone pour détecter l'activité de biosenseurs bactériens *in situ*. Un micro-spectromètre Raman équipé d'un laser Nd:YAG à 1064 nm et d'une fibre optique sera aussi disponible au LIEC en février 2014. Cet axe de recherche devrait être renforcé par le déploiement dès 2015 d'une activité "capteurs environnementaux" soutenue par une chaire d'excellence ANDRA-OPE.

Principaux résultats

Depuis septembre 2012, le travail de recherche de Asfaw Zegeye vise à évaluer la disponibilité chimique et biologique de l'antimoine séquestré dans des goethites de synthèse, à l'aide de suspensions de biosenseurs bactériens fluorescents. Grâce aux constructions génétiques développées au LIEC (resp. Patrick Billard), ces biosenseurs ont une réponse à l'antimoine, dose-dépendante entre 0.1 et 50 μM et sensible à la spéciation du métal (Sb^{III} vs. Sb^{V}) ou à la présence de ligands organiques.

Le biosenseur bactérien passif utilisé (*D10B_pars::gfp*) est construit à partir du promoteur *arsR* de l'opéron *ars*, régulant des systèmes cellulaires de détoxification de l'arsenic et l'antimoine. Dans une gamme de concentrations allant de 100 nM à 10 μM de Sb^{III} , l'intensité du signal de fluorescence émis par le biosenseur est dose-dépendante et suit une loi en puissance fonction de la spéciation de l'antimoine. En effet, le promoteur *arsR* s'avère plus sensible aux formes $\text{Sb}(\text{III})$ que $\text{Sb}(\text{V})$, la forme trivalente étant reconnue comme la plus toxique. Les résultats indiquent aussi que la présence de ligands organiques carboxylés ou de métabolites, comme le tartrate, accroît de manière significative l'internalisation de Sb^{III} dans les cellules en modifiant, sans doute, la dynamique de transfert du métal au niveau de la paroi cellulaire.

Un biosenseur actif *S.putrefaciens_pArs::ecfbfp* est actuellement développé afin d'étudier *in situ* la mobilisation de l'antimoine à partir de goethites de synthèse ($\alpha[\text{Fe,Sb}]\text{OOH}$) par des bactéries ferri-réductrices anaérobies. Contrairement au rapporteur conventionnel de type GFP (Green Fluorescent Protein), la maturation de la protéine fluorescente utilisée *EcFbFp*, ne nécessite pas la présence d'oxygène. Ce système rapporteur est donc plus approprié aux mesures de mobilité des métaux les plus labiles en conditions anoxiques (e.g. dans les sols tropicaux saturés).

Une fois validée, cette construction génétique permet de suivre des biosenseurs et pourra être transposée à d'autres métaux de transition, pour lesquels les gènes senseurs sont déjà connus et répertoriés : Fe, Cd, Ni, Co, Cu, Pb, Hg, Zn, Ag, Sn, As... En revanche pour les Terres rares, W, Sc et les métaux de la filière photovoltaïque (Ga, Ge, In),

les gènes sensibles, s'ils existent, ne sont pas encore connus.

Perspectives

Dans le cadre d'une action transversale inter-PRA du LabEx RESSOURCES21, les biosenseurs bactériens à antimoine, décrits ci-dessus, seront employés sur des prélèvements de sols et de stériles collectés sur des sites miniers français du Massif Central, Cévennes et Limousin riches en antimoine et autres métaux (As...).

Les biosenseurs bactériens développés seront déployés dans le cadre de contaminations minières polymétalliques ou pour étudier la mobilité des métaux en zone vadose dans les sols et les sédiments contaminés.

La gamme de couleur de protéines fluorescentes dont nous disposons aujourd'hui (9 types répartis entre 390 et 650 nm, ANR Blanc HÆSPRI) permet aussi d'envisager, à court terme, des détections multiples et simultanées de métaux, via l'analyse de signaux multiplexés produits par des combinaisons de biosenseurs multicolores. Des essais de validation en microcosmes simplifiés associant des plantes, des sols contaminés ou des minerais et des microorganismes seront réalisés.

A moyen terme, pour identifier les gènes sensibles aux Terres rares et aux métaux de la filière photovoltaïque, le criblage exhaustif d'une banque de 1710 promoteurs bactériens (disponibles au LIEC) est envisagée.

La PRA6 pourra aussi bénéficier : (i) des modèles physiques chemo-, electro-, hydrodynamique développés au LIEC (resp. Jérôme Duval) pour décrire les modes de transport des contaminants métalliques au travers des parois des biosenseurs bactériens ; (ii) des modèles SMA (Systèmes Multi-Agents) utilisés au LSE (resp. Sophie Leguedois), dont le formalisme est bien adapté à la représentation de systèmes hétérogènes, ouverts et dynamiques comme les systèmes résidus-plantes-biosenseurs.

L'approche systémique via les biosenseurs aidera ainsi à dépasser les approches thermodynamiques et peu prédictives habituellement utilisées pour l'analyse de l'éco-dynamique des métaux, en contexte supergène.



3 FAITS MARQUANTS 2012-2013



24 MAI / 16 JUIN

RENAISSANCE NANCY 2013

MOMENTS D'INVENTION

INVITATION À UN VOYAGE POUR DEMAIN ET APRÈS

PLACE CHARLES III / NANCY



REN
NANCY
2013



Faits marquants

a- Avancées scientifiques

Fractionnement isotopique du nickel (Post-doctorant Nicolas ESTRADÉ) : Collaboration CRPG-LSE

Ce projet a permis la maîtrise analytique de la mesure des différents isotopes stables du Ni par la méthode d'ajout de double traceur (double spike). Le $\delta^{60}\text{Ni}$ peut être mesuré dans les échantillons environnementaux (roche, sol, eau, plante,...). Les résultats montrent que le fractionnement a lieu essentiellement lors du passage en solution du Ni qui favorise les isotopes lourds. Ainsi, les sols sont appauvris en ^{60}Ni par rapport à la roche suite à l'altération, le Ni perdu étant drainé dans les eaux. L'entrée dans la racine ne fractionne pas le Ni par rapport à la solution. Chez les plantes qui ne transloquent que peu le Ni vers leurs parties aériennes, il y a un enrichissement progressif en isotopes légers avec l'éloignement à la racine. Chez les plantes hyperaccumulatrices de Ni qui transloquent tout le Ni vers les feuilles et les fleurs, il n'y a pas de fractionnement. La litière ré-enrichit les sols en Ni plus lourd et signe donc le recyclage biogéochimique du Ni dans les sols.



Cycle du Germanium et éléments accompagnateurs dans les concentrations métalliques (1^o année Thèse Rémi BELISSONT)

Le germanium est un sous-produit majeur des concentrations métalliques, qu'il soit à l'état de traces dans les minéraux (e.g. sphalérite, chalcopyrite) ou en faibles volumes de minéraux du Ge (e.g. renierite, germanite). L'objectif est de comprendre les mécanismes et les conditions thermodynamiques liés à la mobilisation du Ge, son transport, et son dépôt dans des minéralisations enrichies en Ge. L'originalité des travaux réside dans le couplage d'analyses élémentaires par LA-ICP-MS (in situ, Ge et éléments mineurs/traces associés), par synchrotron (état d'oxydation de Ge et accompagnateurs) et isotopiques (Ge) par MC-ICP-MS. Les premiers résultats portent sur les sphalérites du gisement de Saint-Salvy, dont les teneurs en Ge peuvent atteindre 2500 ppm. Les analyses par LA-ICP-MS mettent en évidence un contrôle cristallographique de l'incorporation des éléments mineurs/traces dans les différents types de zonages observés où se distinguent nettement deux groupes d'éléments : i) Fe, Cd, In et Sn qui sont corrélés dans les zonations

rythmiques ; ii) Cu, Ge, Ga, Sb et Ag qui sont corrélés dans les zonages sectoriels. Ces corrélations suggèrent des mécanismes de substitution couplés étendus pour les éléments mono-, tri- et tétravalent, dans lesquels Cu, monovalent, équilibre les charges. Une synthèse des corrélations entre éléments en traces dans les sphalérites a permis de discriminer les associations élémentaires typiques des principaux types de gisements. La large gamme de composition isotopique du Ge ($\delta^{74}\text{Ge}$ de -2,07 à +0,91‰) confirme le modèle de précipitation de la sphalérite en système ouvert à partir de fluides hydrothermaux de basse température (100-150°C), injectés par pulses périodiques (Belissant et al., 2013, *Geochim Cosmochim. Acta*, sous presse).

b-Distinctions et responsabilités

International

Lev Filippov (GéoRessources) est nommé représentant de la France à l'International Advisory Committee de l'International Mineral Processing Council

Les congrès de l'IMPC couvrent tous les aspects du traitement des minerais (minéralogie appliquée, comminution, séparations physiques, flottation, équipement, recyclages, hydrométallurgie, ...). Ils ont lieu tous les 2 ans, celui de 2012 a eu lieu en Inde et le prochain se tiendra au Chili en octobre 2014. <http://impc-council.com/>

Jean-Jacques Royer (GéoRessources) a été honoré pour sa contribution dans le 3&4 D (working package WP2) du projet European ProMine en avril dernier à Levi (Lapland, Finland).

Guillaume Caumon (GéoRessources) fait partie depuis 2012 du comité scientifique du Centre de Technologie Minière au Chili. <http://www.amtc.cl/?p=2426>

Michel Cathelineau (GéoRessources) est responsable du programme Connaissance et Technologie du Sous Sol pour son exploitation et usage durable (CESSUR), piloté par le comité thématique Ressources géologiques et développement durable (CT5) de l'INSU/CNRS depuis Juillet 2012. Ce programme finance des actions de recherche sur appel à projet annuel.

Jean-Louis Morel (L SE) est nommé membre du Conseil Scientifique de l'institut français de la biodiversité.

Dans le cadre de ses collaborations avec l'Université Sun Yat-sen, Jean Louis Morel a participé à une

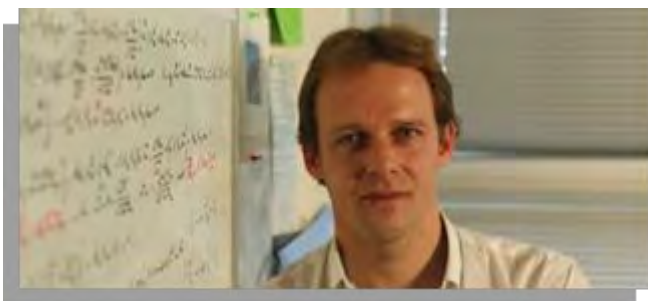
visite officielle des sites miniers des REEs les plus importants de Chine, dans la province du Jiangxi: un potentiel de 198 km² et 200000t de REEs à exploiter; des techniques à développer notamment pour les zones de faible teneur. L'intérêt de nos partenaires se situe au niveau des technologies pour l'exploitation des zones à faible teneur et la gestion des séquelles environnementales liées à la gestion des sites exploités (10 km²) avec des conséquences au niveau de la santé des populations. Des programmes d'échanges sont à l'étude sur ces sujets.

Prix et distinctions



Après avoir obtenu la médaille d'or SGA-Newmont 2013, **Michel Cuney** (GéoRessources) vient d'être nommé professeur honoraire de l'East China Institute of Technology de Fuzhou qui forme la plupart des géologues chinois à l'exploration et à la recherche en Chine, suite à son passage dans cette université. Il a également reçu le prix Barbier de la SGF et le prix de la Société Industrielle de l'Est.

Médaille de Bronze du CNRS 2011, **Jérôme Duval** directeur de recherche au LIEC (Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux) a reçu le 7 novembre dernier le 1er prix du chercheur de la 13e édition du "Prix régional de la Thèse et du Chercheur" organisé par la Région Lorraine. Ses travaux visent à identifier, mesurer, modéliser et prédire les propriétés physicochimiques des (bio)systèmes colloïdaux naturels (bactéries, virus, particules organiques comme les acides humiques, nanoparticules, etc) et leurs conséquences sur les processus qui régulent dans les systèmes aquatiques le devenir des contaminants métalliques ou bien encore la formation de biofilms, d'agrégats ou de sédiments.



- Le prix Barlow de la CIM a été décerné à **Olivier Rabeau** (GeoRessources) et collaborateurs pour leur article dans Mineralium Deposita
http://www.cim.org/en/Services/CIM-Awards/Barlow_Memorial_Medal.aspx

Bernard Marty (CRPG) a été nommé Fellow de la Geochemical Society et de l'European Association of Geochemistry, pour ses contributions dans le domaine de la géochimie.
<http://www.eag.eu.com/awards/geochemical-fellows>

Pablo Mejia et collaborateurs ont reçu un prix pour leur Poster à l'Ecole Thématique du CNRS sur les ressources minérales à Genève en 2013 (Improving Ore Kupferschiefer Assessments with support Vector Machine)

c-Communications scientifiques

SGA Mineral Deposits

Les chercheurs du LabEx RESSOURCES21 ont réalisé une quinzaine de présentations lors du congrès SGA qui s'est tenu à Uppsala en Suède du 11 au 15 août 2013. Il a regroupé près de 670 chercheurs et industriels travaillant dans le domaine des ressources minérales. La prochaine édition du congrès SGA aura lieu à **Nancy** du 24 au 27 août 2015.



Society of environment toxicology and chemistry (SETAC)

A l'occasion du congrès SETAC qui s'est déroulé en mai 2013 à Glasgow, Laure Giamberini a présidé la session relative aux éléments stratégiques du 21ème siècle. La session composée de cinq présentations a montré que l'approche utilisant l'analyse/l'évaluation du cycle de vie (LCA) présentait un potentiel pour gérer le risque lié aux matériaux critiques. Les indicateurs produits pourraient constituer des mesures intégrées au niveau européen pour gérer l'utilisation et le risque des ressources naturelles.

d-Formation

EnvironMetal Isotopes 2013 (EMI 2013), Ascona, Suisse

Les progrès récents dans les techniques d'analyses par MC-ICP-MS et TIMS permettent de détecter de faibles variations de composition de nombreux isotopes « non-traditionnels », e.g., Fe, Ni, Zn, Cd ou encore Ge. Les signatures isotopiques mesurées fournissent des informations importantes sur les

sources et les processus de fractionnement de ces métaux dans le cycle biogéochimique de ces éléments.

La conférence de l'EMI a réuni une cinquantaine de chercheurs et doctorants dans le but de présenter et discuter les derniers résultats sur le fractionnement isotopique des métaux sur la base de travaux théoriques, expérimentaux ou de terrain, et leur implication environnementale (traçage de polluants, zones critiques et processus). L'objectif est également de communiquer sur les avancées analytiques et les méthodes de travail pour la production de données isotopiques de qualité.

Rémi Bélistont (Thèse Labex) a participé à ce workshop et a présenté les résultats de ses travaux en isotopie du germanium.

Le master DUBY« Matières premières minérales, ingénierie et management des risques », porté par l'École des Mines de Nancy et l'ENSG, a reçu un avis favorable du Ministère. Il a pour vocation de former des cadres miniers de pays producteurs et exportateurs de matières premières afin de favoriser la création de liens durables avec ces pays, les opérateurs miniers et leurs futurs dirigeants. Ce nouveau master ouvrira à la rentrée 2014 et prendra le relais du CESTEMIN et du CESEV suite à l'arrêt des financements par le ministère en charge des mines pour raisons budgétaires. Ces deux premiers cycles avaient été créés à Nancy en 1975 à l'École Nationale Supérieure des Mines et à l'École Nationale Supérieure de Géologie, respectivement dans les domaines des techniques minières (CESTEMIN), de l'exploration des gisements et de la valorisation des minerais (CESEV).

Master Erasmus Mundus EMERALD

EMerald est un programme de formation en anglais de 2 ans, visant à former une nouvelle génération de jeunes professionnels sur les techniques modernes d'exploration et d'exploitation des ressources. Cette formation intègre les dernières connaissances sur la caractérisation des ressources, leur modélisation et les procédés de valorisation.

Ce master lancé officiellement en **septembre 2013** regroupe les universités de Liège, l'université de Lorraine/ENSG, l'université de Lulea et l'université de Freiberg.

<http://www.emerald.ulg.ac.be/>

e-Réseaux et contacts

Rencontre avec la société de l'industrie minérale

Le directeur de RESSOURCES21 (Frédéric Villiéras) et son directeur scientifique (Michel Cathelineau) ont rencontré la section régionale de la Société de l'Industrie Minérale - SIM le 5 juin 2013. Cette rencontre a été l'occasion pour les responsables de présenter RESSOURCES21 ainsi que

le pôle OTELO dans lequel le projet s'intègre. Le congrès de la SIM 2013 eu lieu à Besançon début octobre 2013. Des chercheurs et des étudiants de l'ENSG et de l'ENSMN étaient présents sur le salon. <http://www.lasim.org/>

Lancement du projet européen 'Trans-Atlantic Micromechanics Evolving Research' (TAMER)

Ce projet européen qui s'inscrit dans la thématique "*Materials containing inhomogeneities of diverse physical properties, shapes and orientations*" a été obtenu dans le cadre de l'IRSES (International Research Staff Exchange Scheme) - Actions Marie Curie et regroupe dix universités. Ce projet dans lequel le professeur A. Giraud (GeoRessources, ENSG) est impliqué, fait suite à l'accueil du professeur Igor Sevostianov (NewMexico State University, NMSU) sur la période de juin-juillet 2012, qui n'aurait pu avoir lieu sans le soutien du LabEx RESSOURCES21. La totalité du projet est financée pour une durée de 4 ans à hauteur de 1.2 M euros.

Participation au réseau Eramin

Michel Cathelineau, Anne-Sylvie André-Mayer et Lev Filippov ont participé aux ateliers ERAMIN consacré à la définition de la feuille de route H2020 de la Communauté européenne dans le domaine des Ressources minérales, qui se sont déroulés successivement à Stockholm (Février 2012 (M.C.), à Francfort (septembre 2012, M.C., A.S. AM, L.F.) et Lisbonne (M.C., Mars 2013).

On peut retenir les lignes suivantes parmi les objectifs susceptibles de faire l'objet d'actions soutenues:

Dans le domaine de l'exploration

- développement des systèmes de cartographie minière (Mineral system mapping) ;
- progrès à faire en modélisation 2/3/4 D, et sur les modèles génétiques de dépôts ;
- nécessité d'une meilleure intégration entre exploration, analyse structurale s.l., géophysique, et géomodélisation.
- établir un standard européen pour les classifications de gisements, et créer une infrastructure européenne d'exploration utilisant des modèles 3D.

Dans le domaine de l'extraction

- mettre l'accent sur le développement durable (sustainability) pour améliorer la perception du public ;
- prendre en compte les aspects géometallurgiques (tenir compte de la chaîne géologie-minerai-process), comme un problème transverse ;
- améliorer les techniques, par exemple celles nécessaires à l'exploitation des fonds sous marins, avec le souci de la vigilance quant à l'impact environnemental ;

- améliorer les conditions de travail en mine (H&S).

Dans le domaine du traitement des minerais

- traiter le problème des fines, qui n'est pas seulement un problème de flottation ;
- optimiser l'utilisation des eaux salées, réduire les pertes d'eau et la consommation d'eau en général, favoriser la séparation minérale à sec ;
- réduire les pertes (beaucoup trop de métaux sont perdus, car non séparés, ou dans les stériles) ;
- « Green stock piling » (prévoir la ré-exploitation future des stériles) ;
- développer de nouvelles technologies de broyage ;
- essayer de traiter et d'optimiser le traitement de concentrés complexes afin de ne pas laisser des ressources non traitées ;
- développer du monitoring in situ des process ;
- développer le « bio-leaching » (en particulier pour les fonds sous-marins) ;
- minimiser les impacts environnementaux ;
- accroître l'efficacité énergétique.

Dans le domaine de la métallurgie

- améliorer les méthodes d'extraction par solvants, liquides ioniques, etc ; ..
- créer un centre d'hydrométallurgie ;
- traiter les minerais pauvres et complexes (avec métaux en traces), en tenant compte de leur minéralogie (exemple : une mine d'or devient actuellement le principal producteur de tellure) ;
- développer des méthodes d'extraction à partir des solutions de lixiviation, voire des eaux d'exhaure ou de verses à stériles ;
- comment utiliser les minerais à leur maximum ?

Dans le domaine de la fermeture des mines/remédiation

L'Europe devrait devenir un leader mondial dans le domaine de « sustainable, environmentally friendly mining (and metallurgy) » et un modèle dans le domaine HS (réduction des bruits, vibrations, poussières).

- développer de nouvelles méthodologies pour la réhabilitation des mines, sur le long terme ;
- traitement des eaux de drainage; phytoremediation,
- que pouvons-nous tirer comme bénéfice des stériles ?

Québec Mines

L'Université de Lorraine était présente à Québec Mines 2013 grâce au soutien financier de l'OJFQ et du LabEx RESSOURCES21 et a présenté ses compétences en termes de recherche et de formation dans le domaine de l'exploration minière, de la valorisation, de l'exploitation et de la remédiation.

Le groupe de Nancy a participé au défi Explo pour trois étudiants (master, ENSG) et a présenté une conférence invitée. Le prix pour un travail scientifique de Master a été obtenu par P.A.

Groulier, étudiant LabEx RESSOURCES21, travaillant sur le Nb-Ta de Crevier, Québec.



Cette manifestation a été l'occasion de rassembler une trentaine d'étudiants de l'Université de Lorraine, actuellement employés ou étudiants au Québec dans le domaine des ressources minérales.

PDAC, Québec



Sept chercheurs de Lorraine se sont déplacés à Toronto pour participer au PDAC 2013 (Prospectors & Developers Association of Canada) dans le cadre de RESSOURCES21.

Il s'agit-là d'une opportunité exceptionnelle car il faut habituellement entre 5 et 8 ans après s'être inscrit pour obtenir un stand. Cette année, le PDAC a accueilli environ 30 000 participants et 600 exposants issus du domaine minier. Plus de 125 pays étaient représentés. Participer à cette manifestation a permis de démontrer les compétences lorraines en termes de formation et de recherche, de promouvoir le recrutement d'étudiants à l'international, d'établir et de renforcer les collaborations avec l'industrie minière et minérale mais également de participer au rayonnement de l'Université de Lorraine et du LabEx RESSOURCES21.

Mise en place d'un réseau européen et mondial sur la phytomine

Après avoir été invité pour une conférence à la SETAC en mai 2013 pour exposer les travaux lorrains sur la phytomine du Ni, G. Echevarria a établi un réseau européen sur la phytomine du Ni qui sera probablement financé pour des actions scientifiques communes (Appel d'offres du CSIC espagnol en 2013). Le réseau est constitué de partenaires espagnols (CSIC), autrichiens (BOKU), albanais (UAT) et grecs (TEIKAV). Ce réseau est ouvert à d'autres partenaires stratégiques à l'échelle mondiale : USDA (USA), U. Sun Yat-Sen (Chine), EMBRAPA-Cerrados (Brésil), U. Melbourne, U. Brisbane (Australie). A terme, une communauté scientifique sera réunie pour proposer une stratégie

internationale de recherche sur la phytomine dans laquelle RESSOURCES21 jouera un rôle primordial (Invitation du Professeur Alan BAKER au LSE en 2014).

f-Valorisation, transfert et contrats

Financement d'une thèse IFPEN sur le comportement hydrogéomécanique des milieux fracturés

Une collaboration a été mise en place avec le LAMSID (UMR CNRS-EDF) dans le cadre de la thèse cofinancée par le LabEx RESSOURCES21 au sein de l'axe PRA5 (thèse M. Faivre, 2012-2015) sur la modélisation hydrogéomécanique d'un réseau de failles. Les premiers résultats prometteurs obtenus ont permis la mise en place d'un partenariat avec l'IFPEN autour de l'application de ce modèle à la fracturation hydraulique (thèse IFPEN 2013-2016, B. Paul -Modélisation de la propagation de fissures hydrauliques par la méthode des éléments finis étendus, GeoRessources – LAMSID).

Focus sur le projet Lorver

Le projet LORVER, financé par l'Agence de Mobilisation Economique (AME) de la Région Lorraine et l'Europe (Feder) (budget global : 6,8 M€) propose de restaurer la fertilité de sols dégradés (sur site de stockage de terres contaminées tel que le site Sita-FD et sur friche industrielle tel que la station expérimentale du GISFI à Homécourt suite aux activités industrielles passées) en reconstruisant des sols pour permettre l'implantation de cultures spécifiques à usages industriels (fibres, énergie, biochar, métaux), telles que le peuplier, le chanvre, l'ortie et des plantes hyperaccumulatrice. Il a été lancé en juillet 2012. L'enjeu scientifique est l'acquisition de connaissances sur le fonctionnement et l'évolution à long terme des sites et des sols dégradés. L'enjeu socio-économique est la création d'une filière permettant d'offrir aux propriétaires de sites (e.g. ArcelorMittal Real Estate France, EPFL) une alternative à l'utilisation de terres agricoles pour les productions de biomasse non alimentaires.

Partenaires : quatre entreprises (Valterra (porteur du projet), Sita-FD, Chanvriers de l'Est et SEA-Marconi) ; cinq laboratoires lorrains dont deux du LabEx RESSOURCES21 (LSE et LIEC), le LRGP (VERTBILOR), et le LERMAB (Pôle Fibres Grand Est) ; un centre de recherche (CRP Lippmann du Luxembourg), et deux structures de transfert (PROGEPI et CETELOR).

Innovation

Un projet de start-up visant à développer la phytomine de Ni « ECONICK » a été retenu pour l'année 2013 par la région, l'état et OSEO porté par Marie-Odile SIMONNOT (LRGP). L'objectif est de tester la faisabilité de démarrer une entreprise développant la production de produits nickélicifères purs par le traitement métallurgique adapté de biomasses de plantes hyperaccumulatrices de Ni produites dans les Balkans. Un ensemble de services est mis en place au fur et à mesure de l'état d'avancement du projet pour aboutir à la création de l'entreprise et au lancement commercial du produit dans les meilleures conditions. De plus, grâce à OSEO (concours émergence) vont être financés : une étude de marché, une étude de propriété intellectuelle et un volet technique pour évaluer la pertinence de créer une start-up.

g-Actions à destination du grand public

Ces métaux qui nous entourent – Renaissance Nancy 2013- Moments d'invention

Les chercheurs d'OTELO ont présenté la recherche sur l'exploitation des métaux rares qui se trouvent dans les objets de notre quotidien. Découverte d'échantillons, progrès technologiques, expériences diverses et échanges avec le grand public ont été au cœur de cette initiative. Ceci s'est déroulé chaque jour, de midi à minuit place



Charles III – Nancy, du 11 au 16 juin 2013.

Approximativement 150 à 180 personnes par jour se sont intéressées au sujet des métaux stratégiques, ont assisté aux démonstrations et ont eu des échanges avec les chercheurs présents. Le public s'est particulièrement interrogé sur la réalité des métaux dans le monde de tous les jours, le risque vis à vis de l'approvisionnement, l'impact économique en Lorraine. Cette première opération RESSOURCES21 a été une réussite et pourra être renouvelée avec un fond et une première expérience solides.

Pour en savoir plus : <http://nancy2013.fr/Ces-metiaux-qui-nous-entourent?lang=fr>, et video sur you tube : http://www.youtube.com/watch?v=oBw1_XtHHyE

h-Ateliers thématiques

Ateliers Nickel et Terres Rares

Les ateliers Nickel du 21 mars 2013 et Terres Rares du 2 avril 2013 ont réuni plus de 50 chercheurs et ont été l'occasion de faire un état des connaissances tant au niveau de l'intérêt stratégique, que des travaux déjà entrepris par les équipes du Labex.

L'atelier Nickel a permis de démontrer la richesse des approches des laboratoires du Labex sur le nickel, et a révélé l'existence d'une véritable communauté autour de ces thématiques (genèse des gisements, traitement des minerais, environnement, modélisation). Les présentations lors de cet atelier sont les suivantes :

- Contexte, problèmes scientifique et industriels, minéralogie : état des connaissances (silicates et oxydes de fer), (Michel Cathelineau)
- Altération- premiers essais de modélisation (PRA5- Fabrice Golfier)
- Transferts superficiels, sols, phytoremédiation (PRA2 - Guillaume Echevarria)
- Les effets croisés du Ni et parasitisme chez le bivalve d'eau douce, Dreissena (PRA3 - Laure Giambérini)
- Les effets du chrome sur les algues et daphnies (PRA3- Davidé Vignati)
- Discussion générale

L'objectif de l'atelier Terres Rares était de réaliser un inventaire des activités depuis la métallogénèse, jusqu'aux aspects traitement des minerais et impacts environnementaux et de réfléchir aux actions transverses qui pourraient être engagées dans le cadre du Labex Ressources 21.

Le programme de l'atelier s'est organisé comme suit :

- Importance des terres rares, inventaire des gisements, travaux en cours sur la métallogénèse et problèmes scientifiques : les terres rares comme traceurs de sources et milieux traversés, transport et fractionnements (Michel CATHELINEAU)
- Avancements dans l'analyse localisée de l'ensemble des terres rares dans les matrices minérales (PRA1-Marie-Christine BOIRON)
- Points sur les aspects analytiques : potentialités au CRPG (PRA4-Béatrice LUAIS)
- Valorisation par voie physique des poudres "luminophores" sur le recyclage des terres rares à partir des lampes à économie d'énergie. Récupération des TR à partir des résidus de traitement des bauxites (PRA2-Lev FILIPPOV)
- Caractérisation et compréhension de la dissémination des métaux stratégiques dans l'écosphère et impact écotoxicologique. (Veronica GONZALES, Post-Doctorante Labex)
- Impacts environnementaux des agents de contraste au gadolinium : situation locale, approches cellulaires et in vivo (PRA3 - Marc PARANT)

L'atelier s'est terminé par une discussion générale avec l'ensemble des participants.

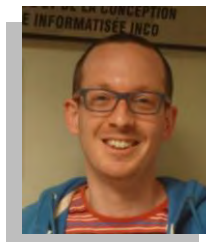
Atelier Stratégie Labex Ressources 21

Les acteurs du projet ont participé à deux ateliers stratégiques leur permettant de prendre du recul sur le projet RESSOURCES21, son mode de fonctionnement et ses objectifs. La première session



qui a fait appel aux techniques de créativité a permis de voyager dans le monde de l'imaginaire au cours duquel les participants ont défini le projet idéal, sans limite ni contrainte. Des idées nouvelles ont ainsi émergé et une réelle dynamique de groupe s'est créée. Le second séminaire a permis aux participants de réfléchir à l'ambition que pourrait se donner RESSOURCES21 sur le long terme. Une déclaration de vision commune déclinée en objectifs stratégiques a ensuite été élaborée (réponse plus concrète et tournée vers l'action). Ces ateliers ont finalement permis d'établir les bases pour établir un plan stratégique et opérationnel commun mais également de créer une réelle cohésion de groupe.

i-Mobilité internationale et accueil de chercheurs



Yann GUNZBURGER **Six mois pour développer de nouvelles collaborations au Canada**

Yann Gunzburger, maître de conférences rattaché au laboratoire GéoRessources et responsable du parcours « Exploitation et stockages » du master GPRE (Géosciences, Planètes, Ressources, Environnement) a effectué actuellement un séjour scientifique de 6 mois au Mine Design Laboratory de l'Université McGill à Montréal en tant que chercheur invité. Ce séjour, en partie financé par le labex Ressources21, est destiné à développer les contacts avec les universités québécoises et l'industrie minière canadienne sur les sujets relatifs à l'exploitation des ressources naturelles, dans le but de faire émerger de nouvelles collaborations de recherche et de formation. L'un des projets scientifiques sur lesquels il travaille actuellement concerne la compréhension des mécanismes et la prévision des ruptures brutales («rockbursts») survenant dans les mines profondes en roches dures et qui sont responsables de nombreux accidents chaque année.

Claude FORTIN



Professeur à l'INRS Eau-Terre-Environnement (Québec) et titulaire de la Chaire de recherche du Canada en biogéochimie des éléments traces, a été accueilli, du 10 juin au 2 août 2013, au Laboratoire Interdisciplinaire des

Environnements Continentaux (LIEC). Son séjour lui a permis de tisser des liens étroits avec les chercheurs du LIEC mais également de partager ses connaissances afin de maximiser synergies et complémentarité de la recherche sur les terres rares, les métaux critiques et les nanomatériaux. Des axes de coopération scientifique ont été identifiés et des projets seront conjointement présentés. L'échange réciproque et l'encadrement conjoint d'étudiants ainsi que le partage des techniques entre les deux laboratoires sont des perspectives qui ont également été sérieusement envisagées. En effet, un séjour de 3 mois est envisagé en 2014-2015 pour un doctorant dans le laboratoire de M. Fortin afin de collaborer sur le développement d'une approche BLM pour des éléments métalliques trivalents comme le chrome.

Autres accueils

Michel JEBRAK (Canada)
Igor SEVOSTIANOV (USA)
Li GUANGLAI (Chine)
Cam MC CUAIG (Australie)

j) Les post-docs du labex et recrutements

Recrutements

Asfaw Zegeye, actuellement en post-doc au LIEC, financé par le LabEx RESSOURCES 21, a été recruté au concours de CR2 au CNRS (section 30).

Julien Mercadier (UMR GeoRessources) a été recruté au concours CR2 du CNRS sur un profil de métallogénie (section 18)

Antonin Richard (UMR Georessources) a été recruté comme MCF sur un profil « fluides géologiques ».

Albert GALY (Université de Cambridge) a été recruté comme professeur sur un profil en géochimie (CRPG)

Akira ORSUKI a été recruté comme maître de conférences sur un profil en génie minéral (GeoRessources).

Anne-Julie TINET (INRA Avignon) a été recrutée comme maître de conférences sur un profil en milieux poreux (Géoressources)

Nicolas ESTRADE



Après un Master en chimie de l'environnement, N. Estrade a effectué une thèse intitulée « Discrimination des sources anthropiques du mercure dans l'environnement » entre l'université de Pau (IPREM/LCABIE) et le CRPG à

l'université de Lorraine. Au sein du Labex, en collaboration avec le LSE et le CRPG, son travail a été de mettre au point la technique analytique de mesure des isotopes du Ni par « double-spike » pour des isotopes du nickel et permettent au Labex d'avoir un outil analytique utilisable pour des investigations futures.

N. Estrade effectue maintenant son post-doctorat au Canadacorriger du fractionnement instrumental de la machine. Une fois cette étape validée, les variations de composition isotopique du nickel dans le système sol-plantes hyper-accumulatrices de nickel ont été étudiées. Ces plantes ont un intérêt crucial au sein du Labex car leur capacité extraordinaire de prélèvement du nickel du sol leur permet d'assurer des rôles de phytoremédiation sur des sols contaminés ou bien de réaliser du « phytomining » sur des sols riches en nickel. Les résultats obtenus viennent enrichir de façon significative la géochimie des isotopes du nickel et permettent au Labex d'avoir un outil analytique utilisable pour des investigations futures.

N. Estrade effectue maintenant son post-doctorat au Canada

Marc ULRICH



Titulaire d'un doctorat en géologie depuis 2010 et après 2 années d'ATER à l'université de Grenoble, M Ulrich a intégré le laboratoire GéoRessources de Nancy en Septembre 2012. Le sujet de recherche a pour objectif de comprendre la répartition des

métaux d'intérêt économique tels que le nickel, le cobalt, le chrome ou encore le manganèse au sein du profil latéritique en Nouvelle-Calédonie. Le comportement du scandium, élément du groupe des Terres Rares présentant un risque de pénurie à court terme, est particulièrement étudié. Le post-doctorat est en majeure partie financé par le Labex Ressources 21, auquel s'ajoute une contribution financière de la société minière Koniambo SAS de Nouvelle-Calédonie, qui collabore au projet.

M. Ulrich a été recruté en tant que maître de conférences à l'Université de Strasbourg

Veronica GONZALEZ

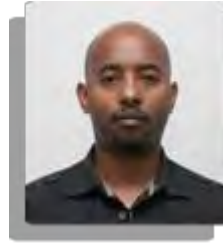


V. Gonzales a obtenu son doctorat en janvier 2012 (Département des Sciences du Sol, Université d'Almeria, Espagne) et est actuellement en post-doctorat sur un projet financé par le LabEx RESSOURCES21. Le sujet de

recherche de son doctorat concernait les problèmes de contamination, toxicité et remédiation des sols contaminés par les activités minières (Université d'Almeria/ VU Université d'Amsterdam). Pour son post-doctorat, elle travaille essentiellement sur les terres rares, un groupe d'éléments dont les applications dans le secteur industriel sont très larges mais dont leur toxicité est peu connue. Elle a effectué une analyse approfondie de la disponibilité d'informations dont l'objectif était d'identifier les besoins en recherche. Ses résultats ont été présentés au Congrès de la SETAC à Glasgow en 2013, suite à une étude comparative de la toxicité des terres rares en utilisant différents organismes aquatiques. L'objectif final étant de comprendre l'écotoxicité et le devenir de ces éléments dans l'environnement. *V.Gonzalez est actuellement en deuxième année de post-doctorat*

Asfaw ZEGEYE

Le travail de recherche de A. Zegeye s'intéresse aux cycles biochimiques des éléments notamment du fer en portant une attention toute particulière sur l'interaction bactérie-minéral.



Cette recherche combine des techniques d'analyse du solide et des approches moléculaires afin de déterminer les vitesses de réaction, les mécanismes de réactions et les produits secondaires de ces transformations

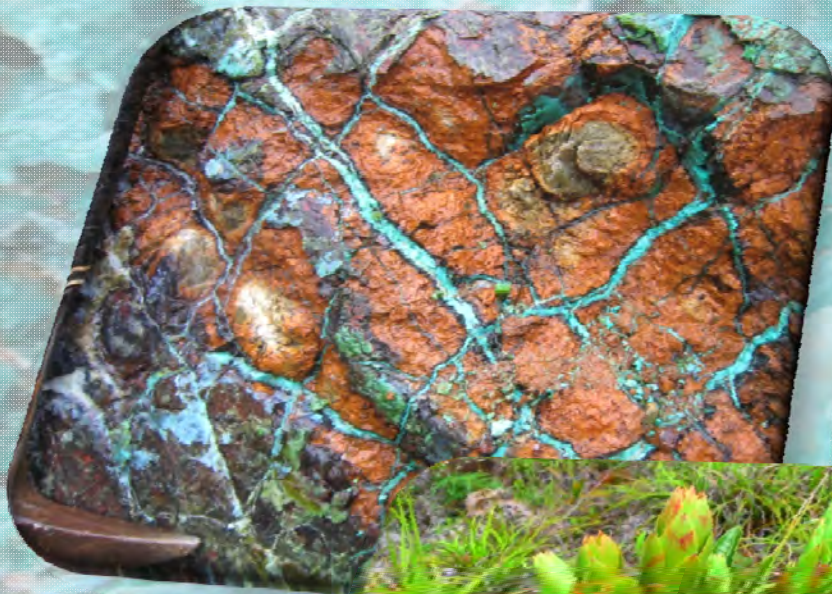
biogéochimiques. Son post-doctorat Ressources 21, au sein du LIEC, s'attache à établir une relation entre la bio-réduction d'oxyde de fer dopé en antimoine et la bio-disponibilité de cet élément en s'appuyant sur des bio-senseurs bactériens.

A. Zegeye a été recruté en tant que chargé de recherche CNRS au LIEC



4 POSTERS

Actions de recherche



Belissant R.^{a,b}, Boiron M.-C.^a, Luais B.^b, et Cathelineau M.^a

^a GeoRessources, CNRS-UMR 7359, Vandoeuvre-lès-Nancy

^b Centre de Recherches Péetrographiques et Géochimiques, CNRS-UMR 7358, Vandoeuvre-lès-Nancy,

Enjeux scientifiques

Le germanium (Ge) est largement utilisé dans l'industrie des hautes technologies (semi-conducteurs, fibres optiques). La position dominante de la Chine sur ce marché (83% de la production mondiale en Ge), représente un risque pour l'économie de l'U.E. et motive une recherche accrue.

Les enjeux sont de comprendre le cycle géologique du Ge et d'identifier les facteurs contrôlant sa concentration dans les concentrations métalliques.

Etat de l'art

Une particularité intéressante du Ge est d'être un élément sidérophile, chalcophile, lithophile et organophile, si bien qu'il est présent dans un grand nombre de réservoirs terrestres.

Dans la croûte, les plus fortes teneurs en Ge sont reportées dans les charbons et certains sulfures. Les gîtes Zn-Cu hydrothermaux de basse température sont souvent enrichis en Ge. Dans la sphalérite (ZnS), le Ge peut atteindre notamment des teneurs de 2500 ppm en substitution du Zn.

Les sphalérites du gisement de Noailhac – Saint-Salvy (Tarn, France), le plus riche d'Europe occidentale, constituent une cible privilégiée pour comprendre le mode d'incorporation du Ge et des éléments mineurs et traces qui l'accompagnent.

Approche méthodologique

L'objectif de cette étude est de comprendre les mécanismes et les processus de concentration du Ge et des éléments mineurs/traces associés (e.g., Cu, In, Ga) dans les sphalérites de Saint-Salvy. L'étude pétrographique détaillée (microscopie, MEB, MSE, Fig. 1) est ensuite approfondie par le couplage d'analyses *in situ* des traces par LA-ICP-MS et analyses isotopiques globales du Ge par MC-ICP-MS.

Les données LA-ICP-MS sont traitées par analyse en composantes principales (ACP) pour identifier les corrélations inter-élémentaires.

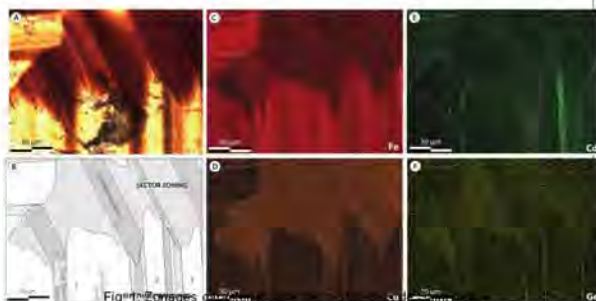


Fig. 1: Cartographies. A. Microphotographie en lumière transmise. B. Schéma interprétatif. C-D Cartographies EDS de Fe et Cu (mineurs). E-F. Cartographies WDS de Cd et Ge (traces). D'après Belissant et al., GCA, sous presse.

Reference : Belissant, R., Boiron, M.-C., Luais, B., Cathelineau, M., LA-ICP-MS analyses of minor and trace elements and bulk Ge isotopes in zoned Ge-rich sphalerites from the Noailhac – Saint-Salvy deposit (France): Insights on incorporation mechanisms and ore deposition processes, *Geochimica et Cosmochimica Acta* (2013), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2013.10.052>, sous presse.

Résultats

- Les analyses élémentaires (LA-ICP-MS, *GéoRessources*) mettent en évidence un contrôle cristallographique de l'incorporation des éléments mineurs/traces dans les différents types de zonages observés.
 - Fe, Cd, In et Sn → **zonages rythmiques** (~140 ppm Ge)
 - Cu, Ge, Ga, et Sb → **zonages sectoriels** (~1100 ppm Ge)
 - Substitutions couplées étendues pour les éléments mono-, tri- et tétravalents

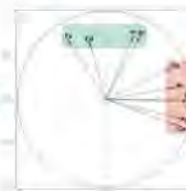
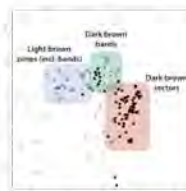


Fig. 2: Analyse en composantes principales (ACP) du set de données LA-ICP-MS. 135 individus, 10 variables. D'après Belissant et al., GCA, sous presse.

- Les analyses isotopiques du Ge (MC-ICP-MS, *CRPG*) montrent une large gamme de composition isotopique du Ge ($\delta^{74}\text{Ge}$ de -2,07 à +0,91‰, Fig.3)
 - Précipitation de la sphalérite en système ouvert à partir de fluides hydrothermaux de basse température (<150°C)
 - Zonages rythmiques → pulses périodiques

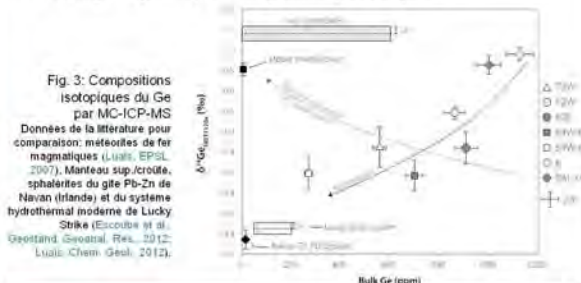


Fig. 3: Compositions isotopiques du Ge par MC-ICP-MS. Données de la littérature pour comparaison: météorites de fer magnétiques (Luais, EPSL, 2007); Manteau sup./croûte, sphalérites du gîte Pb-Zn de Navan (Irlande) et du système hydrothermal moderne de Lucky Strike (Escocce) et al. Geostand. Geochim. Res., 2012; Luais, Chem. Géol., 2012.

Bilan – Perspectives de développement

Ce travail fait l'objet de la publication de Belissant et al.¹ (*sous presse*) dans la revue *Geochimica Cosmochimica Acta*. Sur cette base, des analyses μ -XANES au synchrotron de l'ESRF Grenoble ont été menées sur différents porteurs (dont ZnS) pour déterminer l'état d'oxydation du Ge dans ces minéralisations.

Ces études s'étendent aux minéralisations riches en Ge de contextes de formation différents de celui de Saint-Salvy :

- Kipushi (Copper-belt centre-africaine, R.D. Congo), référence mondiale pour ses concentrations en Ge,
- Barrigão (Pyrite-belt ibérique, Portugal).

Une approche expérimentale complètera cette étude afin d'affiner notre compréhension des mécanismes d'incorporation du Ge dans la sphalérite ainsi que son fractionnement isotopique.

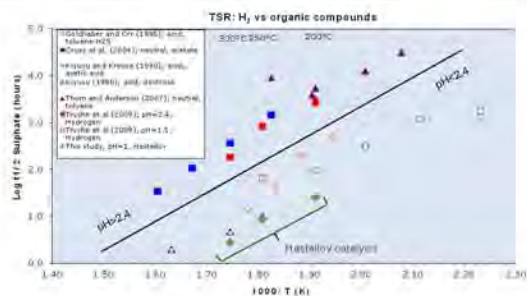
Truche Laurent, Barré Guillaume, Bazarkina Elena, Dubessy Jean

General Framework

Thermochemical sulfate reduction (TSR) refers to the abiological, thermally driven reduction of sulfate to hydrogen sulfide induced by natural electron donors such as hydrocarbons, ferrous iron found in rocks, carbon graphite, methane or hydrogen. The occurrences, and consequences of TSR have been documented in numerous geological observations from around the world at temperatures ranging from 100° to more than 400°C. TSR plays a crucial role in the deposition of metal sulfide ore bodies in both magmatic/hydrothermal and sedimentary settings (MVT, VMS, black-shale-hosted Ni-Cu-Zn-Co ore deposits, Copperbelt).

Objectives

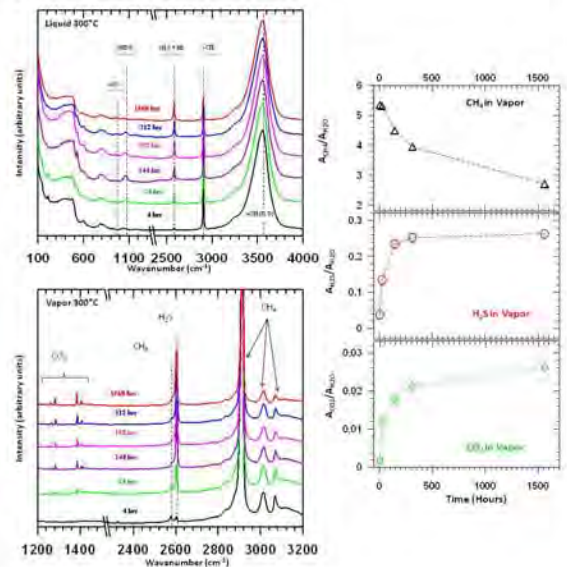
Although the process of TSR has been recognized for nearly fifty years, understanding the critical geologic and geochemical controls has been hindered by: i) the inability of experimentally reproduce TSR under laboratory conditions comparable to those deduced from field sites, ii) the lack of systematic evaluation of the reaction pathway. Understanding The mechanism of H₂S catalysis in sulfate reduction is necessary to constrain both the reaction kinetic, and the sulfur isotopic fractionation models derived from laboratory experiments, which can then be extrapolated to geologic conditions. Also, it is still controversial whether methane, the predominant component of natural gases, actually participates in natural TSR reactions. The aim of the present study is to evaluate TSR reaction rate and mechanism under geologically relevant conditions.



Methods

We employed in situ Raman spectroscopy in silica-glass capillary at temperature ranging from 25 to 350°C in order to measure the identity and stability of sulfur species involved during TSR experiments. We performed original kinetic experiments using methane as reducing agent, and we reproduced classical TSR experiments of Kiyosu and Krouse (1993), Goldhaber and Orr (1995), Cross et al. (2004), and Thom and Anderson (2007). Altogether, these experiments allow us to evaluate the effect of temperature, pH, and sulfur speciation on TSR reaction rate and mechanism.

MgSO₄-S-H₂O-CH₄



Results

In situ Raman spectra collected at high temperatures and pressures in the MgSO₄-S-H₂O-CH₄ and other S(+VI)-S(-II)-H₂O-CH₄ systems demonstrate that (1) the disproportionation of elemental sulfur occurred at temperature above 200°C and produced sulfide and sulfate, and (2) sulfate, in the presence of sulfide, can be reduced by methane within few hundreds of hours at 300°C and few months at 200°C to produce CO₂ and H₂S. This is the lowest temperature at which TSR has been documented so far. TSR may proceed under low temperature conditions, such as those encountered in oil fields, or MVT deposits, provided sulfide is initially present. Methane can act as an efficient electron donor.

Perspectives

We would like to extend the parametric kinetic investigation, by varying pH, sulfate speciation, temperature, and the nature of the reducing agent. Sulfur speciation play a crucial role in TSR processes but it remain to be understood at T above 100°C. Our developed experimental technique will be useful to resolve sulfur speciation in complex system out of thermodynamic equilibrium. Comparisons with natural system through fluid inclusion and sulfur isotopic analysis will be a major tack in 2014.

Marc Ulrich - Michel Cathelineau - Marie-Christine Boiron (GeoRessources)

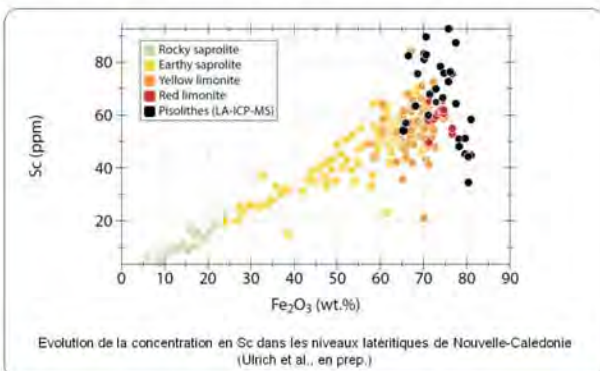
Enjeux scientifiques

Le projet se proposait de répondre aux questions suivantes :

- quelles sont les formations potentiellement hôtes des teneurs les plus élevées en Sc et REE
- quelles sont les teneurs en Sc et REE des roches mères et des roches issues de leur d'altération ?
- quelle est la variabilité verticale et horizontale du Sc et des REE dans les profils latéritiques ?
- l'analyse localisée du Sc est elle possible ?

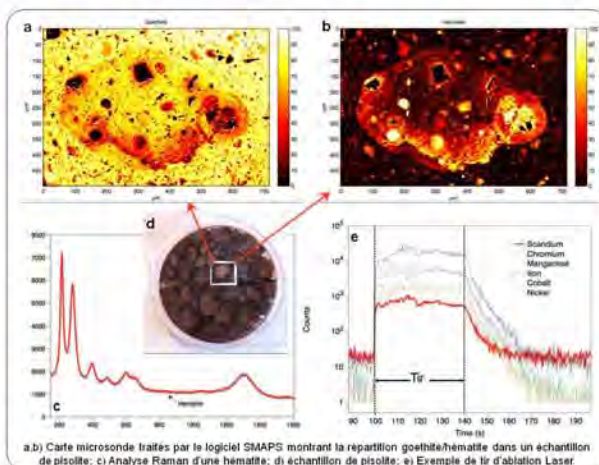
Etat de l'art

Si la Nouvelle-Calédonie est un des grands producteurs de Ni et Co (avec des réserves non négligeables en Cr), des études antérieures ont montré l'existence de minéralisations significatives en métaux du groupe de platine (Traore et al., 2008), et des enrichissements en Sc (Audet, 2008). Ces métaux sont valorisables en sous-produits de l'exploitation du Ni. Le cycle du scandium est par contre très mal connu, mis à part le fait qu'il est présent dans les pyroxènes, et qu'il s'enrichit avec le fer dans les sol résiduels (latérite).



Approche méthodologique

La calibration de l'analyse localisée du Sc a été réalisée en ablation laser-ICP-MS en utilisant des verres NIST et de standards confectionnés à partir de poudres analysées au SARM. En amont des analyses *in situ* par LA-ICP-MS, les espèces minéralogiques en présence dans les pisolites ont été identifiées par spectroscopie raman (dissociation goethite/hématite), par microscope optique à balayage (MEB) et par cartographie chimique par microsonde électronique. Ces approches diverses ont également permis d'acquérir de nombreuses données sur la répartition et la concentration d'autres éléments d'intérêts économiques tels le Ni, Co, Mn ou Cr.



Résultats

Les analyses géochimiques de profils développés sur différents protolithes ont été réalisées au CRPG. Les travaux ont permis d'identifier certains niveaux d'enrichissements dans les profils d'altération, en particulier l'horizon de saprolite fine (latérite jaune des mineurs) et l'horizon de transition. Les teneurs identifiées dans les profils varient de 7 ppm dans le protore harzburgitique à 75 ppm dans les latérites jaunes.

L'analyse quantitative du scandium à l'échelle d'une dizaine de microns a été calibrée jusqu'au ppm à Géorressources ce qui a permis de faire des progrès importants dans la localisation du scandium au sein des hétérogénéités des faciès de limonite rouge et des pisolites des cuirasses.

Bilan – Perspectives de développement

Ce projet a permis de déboucher sur la rédaction d'un projet multipartenaires (GéoRessources, EOST-IPG Strasbourg, ISTERRE-Grenoble, BRGM, SGNC, CEREGE) soumis à l'appel d'offre du CNRT Nouvelle-Calédonie dans la thématique Nickel & son Environnement, en Novembre 2013.

Il a également permis de développer l'intérêt des industriels travaillant en Nouvelle Calédonie, notamment Koniambo SA.

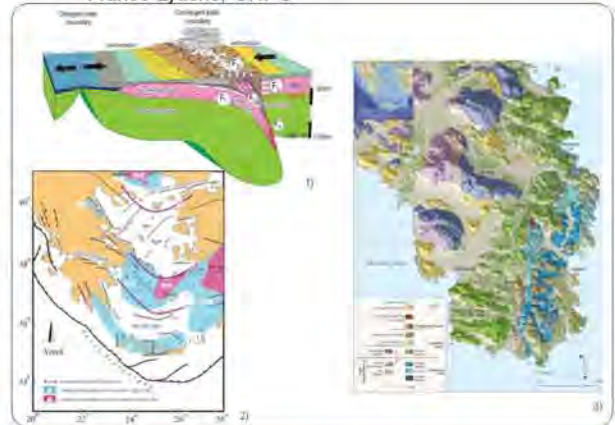
Enjeux scientifiques

L'objectif de ce projet est de comprendre la **genèse**, le **rôle** et l'**évolution** des **circulations fluides** à l'échelle de la **lithosphère** dans un contexte orogénique depuis la **subduction** jusqu'à l'**effondrement** de la chaîne [1]. Cette étude vise à replacer chacun des **événements hydrothermaux** dans son **contexte géodynamique** et ainsi permettre de retracer l'histoire des formations des **gîtes métallifères**. La région du **Laurion** fut choisie d'une part par sa position stratégique au sein du complexe métamorphique égéen [2-3] et d'autre part par ses richesses métallifères.

Etat de l'art

La région du **Laurion** (Grèce continentale) est localisée à l'intersection entre les **chevauchements** et **détachements syn-orogéniques** [2-3] responsables de l'empilement et de l'exhumation des nappes accommodant la formation du **Metamorphic Core Complex** égéen. Cette région a enregistré des degrés de **métamorphisme** distincts et diachrones allant des **Schistes bleus** aux **Schistes verts**, à la **migmatisation** et à la fusion de la croûte (Naxos). De nombreux événements minéralisateurs riches en **Pb-Zn-Fe-Cu-Ag-Au**, pour la plupart associés à l'**évolution tardi-orogénique**, liés à l'extension et à l'effondrement de la chaîne jalonnent la région.

TARANTOLA Alexandre, GéoRessources
 VANDERHAEGHE Olivier, GéoRessources
 SCHEFFER Christophe, GéoRessources
 PIK Raphaël, CRPG
 France Lydéric, CRPG



Résultats

Ces travaux ont permis de :

- Contraindre le **trajet PT des unités métamorphiques du Laurion**, avec une phase D2 (12,5 Kbar, 350 °C – Schistes bleus) retromorphosée par une phase D3 (6 Kbar, 550 °C – Schistes verts) [4]
- Identifier et corréliser ces **phases de déformations** avec celles observées à toutes les échelles (P_n E-W transposés suivant un axe N-S, P_{n+1}) expliquant notamment les successions de marbres visibles dans la vallée de Megala Pefka [5]
- Identifier que les **schistes du Laurion** se sont déposés en contexte de **marge passive**, et les **schistes de Kamariza** en contexte de **marge active**
- Identifier que la **phase de mylonitisation N-S** liée à la formation du MCC au passage d'un régime ductile à fragile a engendré une **dissolution/décarbonatation** des bancs de marbres [6-7] accompagnée d'une genèse de **fluides aquo-carboniques** [8]. Il pourrait s'agir d'un événement associé à la première phase de **formation des minéralisations** identifiées comme étant du type remplacement de carbonates.

Approche méthodologique

L'approche scientifique fut la suivante:

- **Cartographie** et **structure (terrain)**
- **Echantillonnage** systématique (*veines et encaissant*)
- **Pétrographie** (*microscopie optique, MEB*)
- **Géochimie** (*minéraux et roche totale*)
- **Inclusions fluides** (*pétrographie, microthermométrie, Raman*)

Afin de :

- Caractériser l'**évolution thermobarométrique** de la région
- Reconstruire l'**histoire tectonique et métamorphique** de chacune des unités lithotectoniques
- Définir les **contextes de mise en place** des roches magmatiques et sédimentaires associés
- Retracer l'**histoire des fluides** associés au **contexte géodynamique** et aux **événements minéralisateurs**

Bilan – Perspectives de développement

Ces données ont permis de recadrer l'**histoire géodynamique du Laurion**, sur lequel nous sommes désormais capable de relier les différents événements à l'**histoire des fluides et des minéralisations**. Deux publications sont en cours d'écriture.

Ces travaux ont fait l'objet de sujets de **Master** (*Ponthus 2012, Scheffer 2012/2013*) et sont à la base du lancement de la **thèse** de **C. Scheffer** sur la thématique des circulations fluides à l'échelle de la région du Laurion et de l'Eubée.

Très récemment l'équipe de ce projet a démarré une collaboration avec une équipe d'archéologues-spéléologues (D. Morin - Université de Toulouse et de Lorraine), l'IGME (A. Photiades) et l'Université d'Athènes (P. Voudouris) afin d'identifier les minéralisations exploitées durant l'antiquité dans le secteur du Laurion.

Matthieu HARLAUX, Michel CUNEY, Christian MARIGNAC, Julien MERCADIER, Rémi MAGOTT
Laboratoire GéoRessources, Equipe Ressources Minérales

Enjeux scientifiques

Les métaux rares (W, Nb, Ta, Li, Be, Sn) font partie des « ressources minérales critiques » du XXI^{ème} siècle et représentent un enjeu majeur pour l'Europe en terme d'approvisionnement pour des applications de haute technologie. La chaîne varisque européenne possède de nombreuses et riches occurrences de minéralisations à métaux rares, dont le Massif Central Français, qui est un exemple significatif avec des réserves connues de plus de 30 000 t WO₃, essentiellement sous forme de wolframite (Fe,Mn)WO₄. Cependant, de nombreuses questions scientifiques restent ouvertes concernant la genèse de ces gisements, notamment sur l'origine des métaux, la source des fluides, les mécanismes de piégeage et l'âge des minéralisations. La compréhension des processus à l'origine de la concentration des métaux rares dans la croûte terrestre représente donc un enjeu scientifique majeur, en vue de la conception de nouveaux modèles métallogéniques, avec des implications économiques potentielles en terme d'exploration.

Etat de l'art

Les concentrations à métaux rares de la chaîne varisque sont associées spatialement à des granites peralumineux, mis en place au Carbonifère à la fin de la collision continentale varisque. Elles se trouvent sous forme de minéralisations disséminées dans des granites spécialisés et de systèmes filoniens périgranitiques à quartz-wolframite-sulfures. Situé dans le Limousin, au nord-ouest du Massif Central Français, le gisement de Puy-les-Vignes représente un exemple exceptionnel de gisement de tungstène de type « pipe bréchique », particulièrement intéressant pour comprendre la nature des fluides et la mobilité des métaux. La mine qui a produit plus de 4 000 t WO₃ jusque sa fermeture en 1957, fut exploitée jusqu'à une profondeur de 300 m, sans avoir reconnu la totalité de son extension. Le corps de la pipe est constitué de fragments de gneiss encaissants, cimentés par une gangue de quartz déformée. La minéralisation se présente sous forme de filons à quartz-wolframite-sulfures, qui recoupent le corps bréchique. Le gisement, interprété comme une brèche d'effondrement, a été daté à 323,4 ± 0,9 Ma (datation ⁴⁰Ar/³⁹Ar sur muscovite), âge synchrone de la mise en place des granites environnants.

Approche méthodologique

Plusieurs échantillons de veines minéralisées et d'encaissants ont été analysés. L'étude pétrographique a été réalisée au microscope optique et au microscope électronique à balayage, permettant d'établir la séquence paragenétique de formation du gisement. Des analyses géochimiques ont été effectuées à la microsonde électronique afin de mesurer les concentrations des métaux rares en traces dans les wolframites et les oxydes de titane.

Exemple de minéralisation à quartz, wolframite et arsénopyrite. Echantillon de Puy-les-Vignes (à droite)



Oxyde de Ti-Nb-Ta-W-Y montrant des zonations chimiques complexes, observé en microscopie électronique à balayage (à gauche)

Résultats

L'interprétation des relations texturales des assemblages minéralogiques indique une séquence paragenétique en cinq stades successifs : (1) altération hydrothermale des gneiss encaissants (greisenisation, tourmalinisation) ; (2) minéralisation à quartz-wolframite-oxyde de Nb-Ta ; (3) minéralisation à sulfures ; (4) stade silicaté à phengite-feldspath-chlorite ; (5) stade à carbonates-oxydes. Les wolframites et oxydes de titane analysés présentent de nombreuses zonations internes ainsi que des concentrations variables en métaux rares, indiquant un comportement variable de ces éléments en traces dans les fluides minéralisateurs.

Bilan – Perspectives de développement

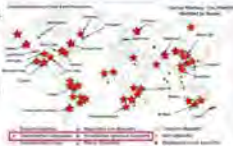
Le gisement de Puy-les-Vignes représente un cas exceptionnel de concentration de métaux rares dans la croûte, particulièrement intéressant pour comprendre les processus à l'origine de l'épisode métallogénique à métaux rares survenu dans l'ensemble de la chaîne varisque en fin d'orogénèse. Récemment, l'accès à de nouvelles collections d'échantillons de Puy-les-Vignes géoréférencés permettra de compléter les données pétrographiques et géochimiques et préciser la séquence paragenétique. Des données géochronologiques supplémentaires seront acquises afin de préciser la genèse de ces minéralisations dans le contexte géodynamique hercynien et leur relation avec la mise en place des granites. L'étude des inclusions fluides contenues dans le quartz et la wolframite permettra également d'avoir accès aux conditions thermobarométriques de formation de ces deux minéraux, permettant ainsi de mieux cerner le modèle métallogénique du gisement de Puy-les-Vignes.

Lydéric France, Guillaume Boudoire, Gaelle Mollex, Pete Burnard

CRPG

Enjeux scientifiques

ENJEUX: Les magmas carbonatitiques représentent les principaux gisements en Terres-Rares [REE] (+P, Nb...) → Métaux critiques, et sont associés à un dégazage en CO₂ important.



PROBLEMATIQUE: Quelle est la genèse et l'évolution de ces magmas atypiques (laves non-silicatées, extrêmement fluides, très enrichies en métaux critiques), et comment s'altèrent-ils? Quel est le mécanisme de concentration des REE, Nb-Ta, P?

OBJECTIFS: Identifier les processus qui régissent la genèse et l'évolution des carbonatites (et magmas alcalins associés) pour pouvoir identifier et quantifier le(s) processus de concentration des REE dans ces magmas, ainsi que les phases porteuses.

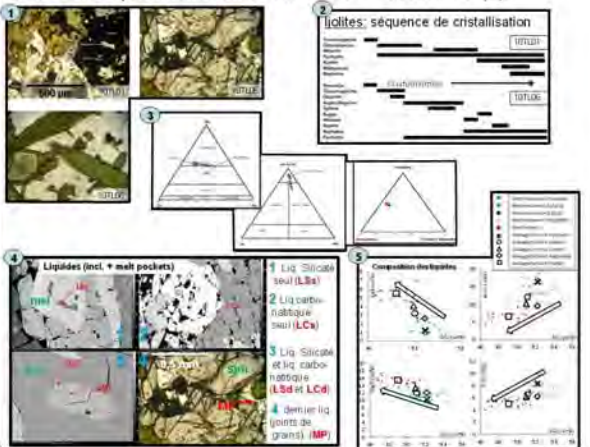
Etat de l'art

- Deux modèles principaux existent aujourd'hui pour la genèse des magmas carbonatitiques:
 - *fusion d'un manteau enrichi en carbone,
 - *fusion d'un manteau classique associé à un fractionnement extrême résultant en l'immiscibilité de magmas silicatés et carbonatitiques.
- L'origine de la forte concentration en REE des produits finaux n'est pas identifiée (magma initial, processus dans la chambre magmatique, ou altération secondaire).

Résultats

L'étude pétrologique (1) et géochimique des enclaves a permis:

- *de caractériser les échantillons (1);
- *d'identifier les séquences de cristallisation (2);
- *d'obtenir les compositions des phases (3);
- *d'identifier différents types et générations de magma (4);
- *d'obtenir la composition des liquides ainsi que son évolution au cours du processus de cristallisation fractionnée (5).



Approche méthodologique

Le projet est basé sur une étude micro-pétrologique et géochimique de détail d'échantillons provenant directement de la chambre magmatique du seul édifice carbonatitique actif aujourd'hui. Ces échantillons sont des roches plutoniques qui ont enregistré (via des inclusions de magma [IM] piégées dans les différents minéraux) les étapes successives de l'évolution chimique du magma depuis son extraction du manteau jusqu'à son enrichissement en REE.

Une fois les séquences de cristallisation des minéraux reconstruites, des analyses in-situ (via EPMA, LA-ICP-MS, et SIMS) seront effectuées au sein des IM pour identifier les fractionnements chimiques mis en œuvre à chaque étape.

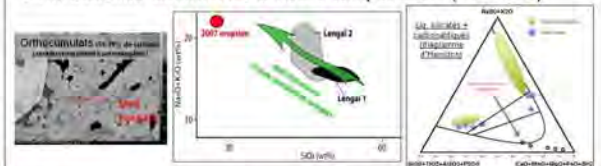
Contexte

- L'Oldoinyo Lengai (OL; Tanzanie) est le seul volcan carbonatitique actif sur Terre;
- Plus de 500 occurrences de magmatisme carbonatitique au cours de l'histoire de la Terre;
- L'OL se situe sur la branche Est du Rift Est Africain; l'activité débute il y a 370ka
- Deux périodes principales: Lengai I (phonolitique) et Lengai II (néphélinitique)



Discussion

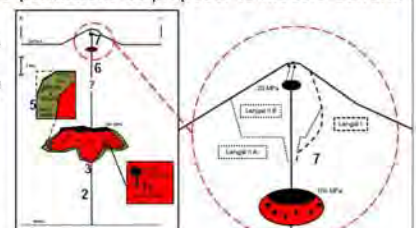
- Les résultats préliminaires permettent de mettre en évidence:
- *jolites formées entre 10-15km de profondeur (géobarométrie);
 - *la cristallisation d'un magma silicaté en bordure de chambre;
 - *l'évolution de la composition du liquide au cours de la cristallisation observée couvre toute la gamme de variation connue pour l'Oldoinyo Lengai;
 - *L'immiscibilité commence à haute température (~1000°C).



Bilan – Perspectives de développement

Les résultats obtenus permettent de proposer le modèle suivant:

1. Fusion partielle (0,3%) à partir d'un manteau type MORB
2. Différenciation du liquide silicaté
3. Arrivée d'un liquide silicaté de composition phonolitique
4. Immiscibilité déjà présente à 500 MPa et au-delà de 900 °C (pôle calcioalcalin)
5. Cristallisation fractionnée (10TL01 et 10TL05)
6. Arrivée d'un liquide de composition néphélinitique et immiscibilité continue (pôle natrocarbonatitique)
7. Migration du liquide carbonatitique + différenciation tardive



Ce projet préliminaire est actuellement poursuivi dans le cadre de la thèse de G. Mollex qui complètera cette approche par une étude expérimentale et la comparaison avec un site minéralisé.

• Origine de l'horizon B1 des komatiites:
• approche expérimentale

Faure François (CRPG, Nancy), Montel Jean-Marc (GéoRessources, Nancy), Arndt Nick (IsTerre, Grenoble), Nicollet Christian (LMV, Clermont-Ferrand)

Enjeux scientifiques

Les coulées de komatiites sont connues pour contenir des amas sulfures présentant des concentrations en nickel, cuivre et PGE d'importance économique. L'origine des métaux semble sans conteste liée à la nature primitive des magmas. En revanche, l'origine du soufre est plus débattue. Cependant l'hypothèse communément admise correspond à l'assimilation par les coulées de leurs encaissants sédimentaires riches en soufre. L'érosion thermique de l'encaissant sulfuré permettant d'enrichir artificiellement la lave en soufre au cours de son écoulement.

Etat de l'art

L'hypothèse d'érosion thermique du substratum a été modélisée en considérant une lave souvent surchauffée s'épanchant de manière turbulente (Williams et al., 2001). Cependant, les coulées de komatiites présentent une structuration en horizons bien définis qui laisse suggérer que le caractère surchauffé de la lave est peu vraisemblable. La compréhension de la formation des amas sulfurés porteurs de métaux passe donc nécessairement par une connaissance du mode de cristallisation des coulées dans leur ensemble.

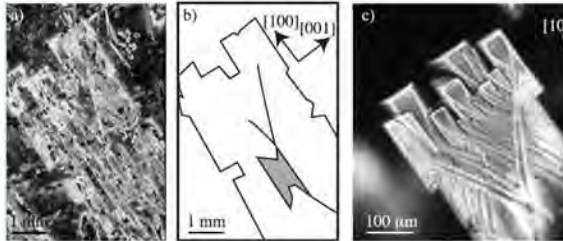
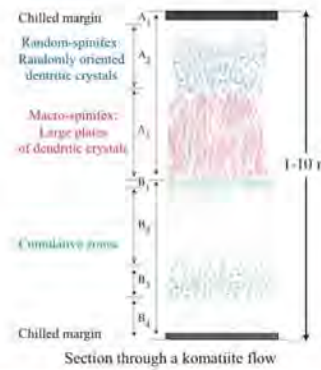


Figure montrant (a) la morphologie d'un cristal B1 naturel, (b) schéma interprétatif du cristal observé en a, (c) morphologie d'un cristal B1 reproduit expérimentalement.

Approche méthodologique

Les expériences de cristallisation dynamique ont été réalisées dans des fours verticaux haute température. Des compositions chimiques simplifiées (CMAS) ont été utilisées afin de s'affranchir, dans un premier temps, du problème du fer. Les charges expérimentales ont ensuite été analysées avec différents types de microscopie (photonique et électronique) et analysées à la microsonde électronique.

The komatiite paradox



Résultats

- 1) La morphologie particulière des olivines de l'horizon B1 a été reproduite expérimentalement en enchaînant un épisode de réchauffement après un épisode de refroidissement rapide.
- 2) Les cristaux B1 correspondent à des cristaux qui se sont formés initialement dans l'horizon A2 au toit de la coulée où la vitesse de refroidissement est rapide et ces cristaux ont sédimenté dans le cœur de la coulée plus chaud.
- 3) Un modèle global de cristallisation de la coulée de komatiite expliquant la formation des différents horizons texturaux est proposé.

Bilan – Perspectives de développement

Le modèle global de cristallisation impliquant une compétition entre l'avancé du front froid dans la coulée et la sédimentation des cristaux dendritiques d'olivines dans l'horizon A2 impose des contraintes sur l'épaisseur de l'horizon B1. Des mesures de terrain précises de l'horizon B1 de différentes coulées de komatiites devraient permettre d'affiner les paramètres de mise en place de ces coulées et de mieux comprendre la formation et la localisation des amas sulfurés associés. Cette partie pourrait être réalisée en collaboration avec Michel Houlié du Geological Survey of Canada.

Michel Cathelineau-(GeoRessources)

C. France-Lanord-(CRPG),

P. Robert-(Otelo))

Enjeux scientifiques

La datation des événements fluides et des phases de formation d'un gisement métallifère est essentielle à la conceptualisation des modèles métallogéniques. Or dans les domaines de basse et moyenne température seuls les minéraux de gangue sont le plus souvent utilisables car seuls porteurs d'éléments radiogéniques. Les argiles sont les phases les plus ubiquistes mais ne peuvent être datées en Ar-Ar, ce qui oblige à utiliser le système K-Ar. L'objectif est donc de redévelopper le K-Ar appliqué aux argiles, notamment les phases les plus fines.

Etat de l'art

La méthode potassium - argon permet par application de l'équation géochronologique, de dater des événements de quelques milliards d'années à plusieurs milliers d'années, en dosant indépendamment K et Ar. Elle devrait permettre de résoudre des problèmes de datation des minéraux de gangue (argiles en particulier) des minéralisations lorsque d'autres outils radiochronologiques ne sont pas applicables.

Vue du spectromètre Thermofischer Argus



Vue du spectromètre Thermofischer Argus

Résultats

Le spectromètre Thermofischer Argus a été testé au CRPG et installé en mai 2013 à Georessources.

La ligne de gaz est en cours de conception et montage, montage qui sera finalisé en fin 2013-début 2014.

Les tests démarreront au premier trimestre 2014.

Approche méthodologique

L'ensemble des équipements comprend :

- les méthodes d'extraction des argiles (dislocation des roches sans création de fines de phyllosilicates hérités et radiogéniques par cycle de cryogénie, extraction par décantation et ultracentrifugation)
- un dispositif d'extraction composé essentiellement d'un four ;
- un dispositif de calibrage (injection de traceur (spike)) ;
- un dispositif de purification qui piègera la presque totalité des composants du mélange issu du four
- un dispositif de mesure comprenant le spectromètre de masse et sa ligne d'introduction.

Bilan – Perspectives de développement

La datation des argiles est du plus grand intérêt pour la compréhension des formations des gisements métallifères, mais aussi pour l'étude des modes de remplissage des bassins et l'identification des sources des éléments détritiques (muscovite, feldspaths) en combinaison avec d'autres approches géochronologiques.

Une collaboration a été amorcée entre Ressources 21, le CSIRO et l'Université de Western Australia (H. Zwingmann) autour de la datation des événements fluides par la datation des argiles. H. Zwingmann devrait séjourner à Nancy dès que la ligne préparative sera connectée au spectromètre

Séjour scientifique de 6 mois au Québec pour conforter la position stratégique de l'UL dans le domaine du génie minier

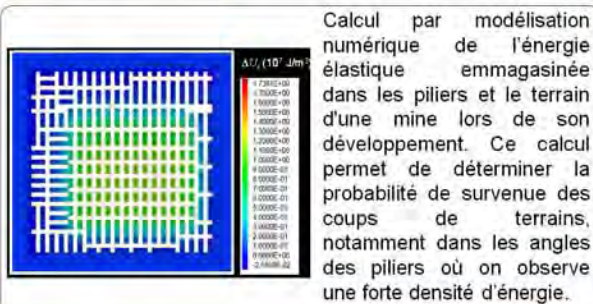
Yann Gunzburger, GéoRessources

Enjeux scientifiques et état de l'art

Alors que la France a longtemps bénéficié d'une expertise reconnue dans le domaine de l'exploitation minière, la fermeture des dernières mines, accompagnée des départs en retraite de ceux qui les ont connues en activité, a entraîné une érosion progressive des compétences nationales en génie minier, tant sur le plan de la formation, que de la recherche et de l'ingénierie. En parallèle, l'intérêt pour les ressources naturelles s'est beaucoup focalisé ces dernières années sur l'amont (processus concentrateurs, prospection) et sur l'aval du cycle minier (traitement des minerais, environnement minier, après-mine), délaissant ainsi les aspects liés aux techniques d'exploitation elles-mêmes, au sujet desquelles d'importants défis techniques se présentent pourtant du fait des conditions de plus en plus difficiles d'accès aux gisements (grandes fosses, mines profondes sujettes aux « coups de terrain », réduction des risques, etc.).



Chevalement de la mine Niobec (Saguenay), où plusieurs coups de terrain ont été enregistrés.



Calcul par modélisation numérique de l'énergie élastique emmagasinée dans les piliers et le terrain d'une mine lors de son développement. Ce calcul permet de déterminer la probabilité de survenue des coups de terrains, notamment dans les angles des piliers où on observe une forte densité d'énergie.

Résultats scientifiques

Mon séjour m'a permis de développer les outils de modélisation nécessaires à l'estimation de la sismicité induite à partir du code commercial FLAC-3D. Ce travail a été valorisé par deux communications dans des congrès internationaux (World Mining Congress à Montréal et Congrès Eurock en Pologne). Un article pour une revue internationale est également en cours de finalisation. Ce travail se poursuivra sous la forme de collaborations entre GéoRessources et l'Université McGill, l'Université Laval et l'Université du Québec à Chicoutimi (réponses conjointes à des appels d'offres, co-encadrement projeté de masters et de doctorats, etc.).

Approche méthodologique

L'objectif de ma mission de 6 mois au Québec, était de :

- de dresser un portrait et de faire un diagnostic de la vitalité du génie minier dans cette grande province minière (formation, recherche, ingénierie, activité économique),
- d'établir ou renouer des collaborations avec des établissements universitaires québécois pour favoriser l'émergence d'actions de recherche communes et promouvoir les échanges d'étudiants et d'enseignants,
- de prendre des contacts auprès des grandes entreprises minières présentes au Québec afin de favoriser les collaborations en R&D et de faciliter le placement des étudiants lorrains en stage et dans leur premier emploi.

En parallèle, j'ai développé un projet de recherche portant sur l'utilisation de la modélisation numérique pour la prévention des coups de terrain (« rockbursts ») dans les mines profondes en roches dures, qui sont des manifestations de la libération brutale de l'énergie élastique emmagasinée dans les zones de concentration des contraintes induites par l'exploitation. La prévention de ce phénomène nécessite la connaissance de l'état de contrainte initial, de ses hétérogénéités locales (associées par exemple aux zones de faille), de son évolution lors de la progression des fronts de taille et le suivi en continu de la sismicité induite. La modélisation numérique est un outil incontournable pour y parvenir.

Bilan – Perspectives de développement

Le Québec apparaît très naturellement comme un partenaire de premier ordre pour le Labex Ressources21 dans le domaine du génie minier, tant sur le plan de la recherche que de la formation et de l'ingénierie. Toutefois, étant donné le dynamisme local existant actuellement au Québec, la mise en place de nouvelles collaborations nécessitera soit de s'appuyer sur des universités québécoises « sœurs », soit de viser des domaines de compétence spécifiques à notre université : modélisation numérique avancée, acquisition et traitement en continu de données (notion d'observatoire), intégration de la dimension humaine (risques et plus largement toute forme de pluridisciplinarité faisant une place aux SHS), etc. Cela ne pourra aboutir sans un renforcement des actions de communication et d'affichage de nos domaines d'excellence (présence dans des forums, séjours scientifiques réguliers, visite d'étudiants en stages, etc.). Il apparaît donc souhaitable de maintenir, voire de renforcer, l'affiche de Ressources21 (et plus largement du secteur des géosciences de l'Université de Lorraine) aux forums du PDAC (à Toronto en mars) et de Québec Mines (à Québec en novembre), entre autres.

Enjeux scientifiques

Les gisements métallifères liés aux enrichissements supergènes (e.g., pour le nickel) sous l'effet de l'altération et du lessivage des roches ultramafiques, sont fortement contraints par le développement et l'extension du réseau de fractures préexistant.

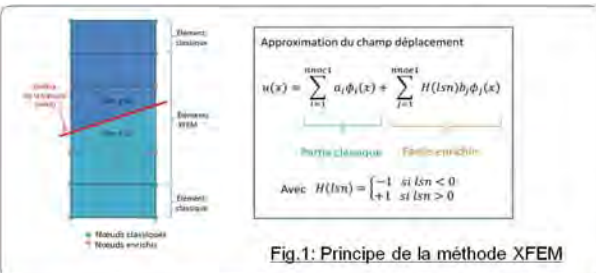
En effet, ces fractures jouent un rôle essentiel dans le processus de minéralisation à la fois en facilitant le lessivage de la péridotite mais aussi en contribuant à la concentration du nickel par l'augmentation de l'espace poral et la remobilisation des phases minérales nickélifères préalablement formées.

L'influence de ces processus de fracturation active sur la formation des gisements et le couplage avec la circulation des fluides restent toutefois encore très mal compris.

Etat de l'art

Une des principales difficultés dans la modélisation du couplage entre dynamique de fracture et écoulement provient du constant remaillage nécessaire afin de tenir compte de l'évolution de la géométrie du réservoir. L'originalité de la méthode des éléments finis étendue (XFEM) (Belytschko & Black 1999), utilisée dans le cadre de cette thèse est d'intégrer directement la discontinuité (la fracture) dans l'écriture de l'équation aux nœuds (méthode « *Level Set* », cf. Fig. 1). Autrement dit, il n'est plus nécessaire de mailler ces objets géologiques allégeant ainsi considérablement les temps de calcul.

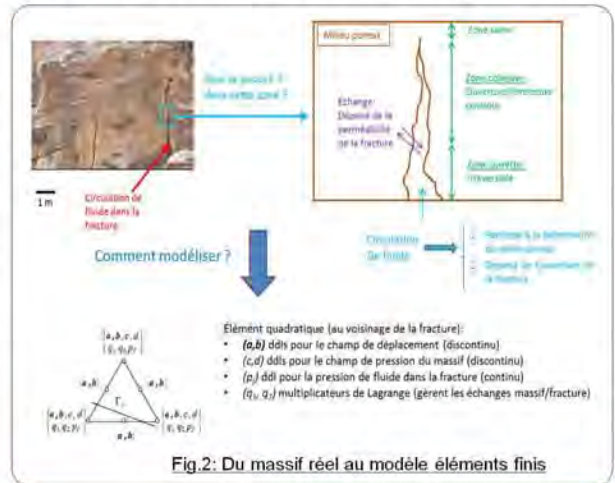
L'approximation des champs de déplacement et de pression est rendue discontinue par l'ajout de degrés de liberté supplémentaires (cf. Fig. 1) définis au voisinage de la fracture.



Approche méthodologique

Le but est d'introduire un nouveau type d'éléments finis hydromécaniques (pour le cas saturé) dans le code de calcul *Code_Aster* (EDF). L'originalité de cet élément est multiple car il peut (Fig. 2) :

- prendre en compte la discontinuité des champs de déplacement et de pression au voisinage de la fracture,
- décrire la circulation du fluide dans la fracture,
- autoriser les échanges de fluides fracture/massif,
- prendre en compte la fermeture ou l'ouverture des parois de la fracture (utilisation d'un modèle de zone cohésive)

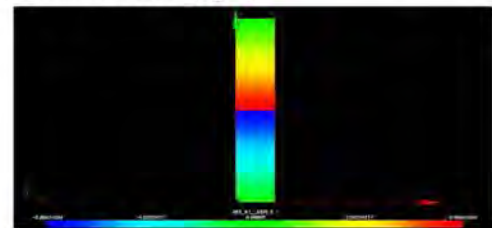


Résultats

Les premiers développements ont conduit à la validation:

- de la prise en compte des *level-sets* dans le modèle,
- du sous-découpage en sous-éléments pour l'intégration numérique de part et d'autre de la fracture,
- de la discontinuité du champ de déplacement au voisinage de la fracture.

La validation est menée (pour une pression de pore nulle) sur un barreau de roche traversé par une fracture où est appliquée une force répartie sur les deux lèvres. Les résultats sont cohérents avec la théorie (Fig. 3)



Bilan – Perspectives de développement

La suite des travaux de thèse consistera à coupler les développements de l'élément HM-XFEM avec la modélisation de l'écoulement et du transport d'espèces chimiques au sein du massif fracturé. Le couplage réactif sera réalisé de manière séquentielle par le biais d'un code géochimique. Les applications futures dépassent bien évidemment le cadre du Labex et devraient conduire par exemple à une meilleure compréhension des processus d'endommagement autour des ouvrages souterrains (stockage de déchet...) ou au développement des méthodes de fracturation hydraulique (thèse IFPEN, GeoRessources –LAMSID, 2013-2016).

Nicolas Estrade¹, Christophe Cloquet¹, Tenghaobo Deng^{1,2,3}, Guillaume Echevarria², Thibault Sterckeman², Jean Louis Morel²
¹CRPG, ²LSE, ³SYSU

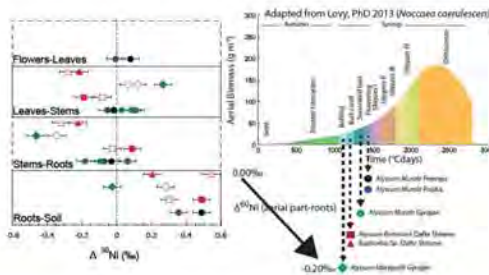
Enjeux scientifiques

- Comprendre les mécanismes du transfert sol-plante du Ni.
- Développer une méthode de mesure à haute précision du fractionnement isotopique du Ni.
- Évaluer le fractionnement de Ni dans des systèmes sol ultramafique - plantes métalphytes.

Etat de l'art

- Très peu de données sur la composition des isotopes stables du Ni et des processus de fractionnement associés en milieu continental.
- Lacunes sur la compréhension de la dynamique du Ni dans les plantes.
- Absence de méthode de dosage des isotopes stables du Ni au niveau du LabEx.

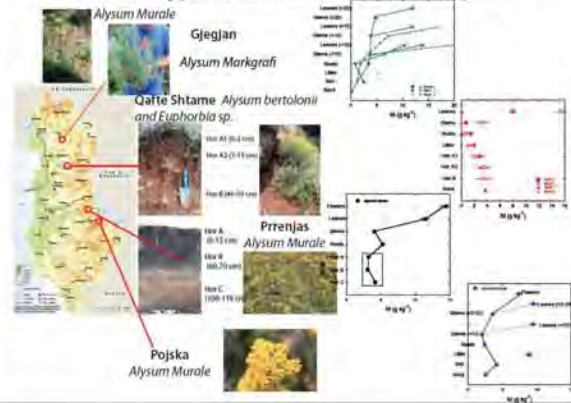
Ni fractionation process



Approche méthodologique

- Echantillonnage *in situ* des roches mères, horizons des sols (dont litière et sol rhizosphérique) et organes végétaux (racines, tiges, feuilles et fleurs) sur quatre sites en Albanie.
- Calibration d'un double traceur isotopique.
- Mise en place d'un procédé de purification du Ni.
- Développement de la mesure à haute précision des isotopes du Ni dans les matrices environnementales.

Nickel hyper-accumulator plant samples



Résultats

- Fractionnement des isotopes du Ni dans les sols et dans différentes parties de la plante. L'amplitude de la variation totale mesurée est d'environ 1,2 ‰.
- Composition isotopique des roches variant de 0 à 0,3 ‰.
- Dans la plante, l'enrichissement en isotopes légers sera dû au faible flux de translocation. L'absence de fractionnement dans les parties aériennes de certaines plantes, des hyperaccumulateurs à un stade phénologique avancé, serait la conséquence d'un très fort flux de translocation.
- Dans les sols, l'enrichissement en isotopes légers serait proportionnel à l'intensité de l'altération des minéraux primaires. Des mesures de fractionnement du Ni échangeable en cours devraient apporter des informations sur les mécanismes de fractionnement dans les sols et dans les racines.

Bilan – Perspectives de développement

- Obtention des premières données au niveau international sur la composition isotopique du Ni dans les systèmes sol-plante.
- Mise au point d'une nouvelle méthode d'analyse isotopique utilisable dans le cadre de futurs projets.
- Renforcement des collaborations avec l'Albanie (Université Agricole de Tirana) et avec la Chine (Université Sun Yat-sen de Canton).
- Présentation des travaux à deux conférences internationales.
- Article dans une revue à comité de lecture international en cours de rédaction.

Veronica Gonzalez¹, Davide.A.L. Vignati¹, Corinne Leyval², Laure Giamberini¹

¹ LIEC, CNRS UMR 7360, Université de Lorraine. Campus Bridoux, Bâtiment IBISE, 8 rue du général Delestraint, 57070 Metz, France

² LIEC, CNRS UMR 7360, Université de Lorraine. Faculté des Sciences, BP 70239, 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy, France

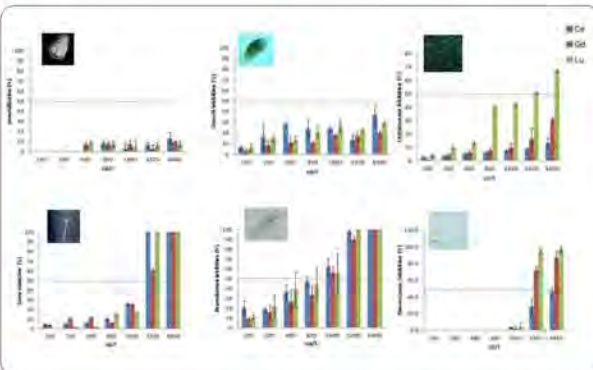
Enjeux scientifiques

Les Terres Rares (REEs) sont un groupe d'éléments présentant un large spectre d'applications dans différents secteurs industriels mais pour lesquels peu d'informations **écotoxicologiques** sont disponibles. Les objectifs sont de (1) **synthétiser les données** écotoxicologiques actuellement **disponibles** sur les REEs afin d'identifier les verrous et les besoins de recherches et (2) vérifier si l'écotoxicité des REEs varie d'une manière **prédictible** selon leur caractéristiques chimiques et selon quelle tendance.

Etat de l'art

On considère que l'**homogénéité chimique** des REEs prédit leur **toxicité** mais actuellement **aucun consensus** n'existe au regard des variations de leur écotoxicologie

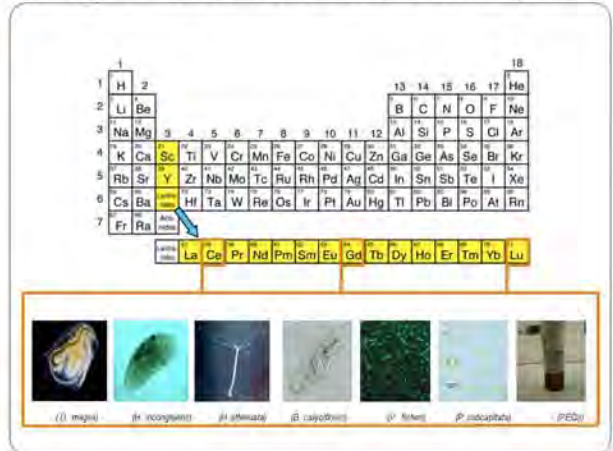
Les données écotoxicologiques concernant les REEs sont rares et hétérogènes. Dans les écosystèmes aquatiques, les études comparatives sont rares. Dans les sols, la plupart des études se focalisent sur les mélanges d'éléments.



Approche méthodologique

1. Revue bibliographique Les informations écotoxicologiques concernant les éléments les moins étudiés ont été collectées. Les jeux de données disponibles dans la littérature ont été analysés.

2. Partie expérimentale : 3 REEs ont été sélectionnés : un léger [Cerium (Ce)], un lourd [Lutetium (Lu)], et un intermédiaire [Gadolinium (Gd)]. The toxicité de ces 3 métaux a été évaluée sur plusieurs espèces aquatiques modèles.



Résultats

1. En comparaison avec celle des autres métaux, l'écotoxicité des REEs reste encore à étudier. Les manques de données concernent l'écotoxicité des éléments lourds dans les systèmes aquatiques et les effets individuels dans les sols.
2. Les Crustacés (*D. magna* & *H. incongruens*) sont les moins sensibles et les rotifères (*B. calyciflorus*) et cnidaires (*H. attenuata*) sont les plus sensibles à l'exposition des REEs.
3. L'écotoxicité des REEs augmente significativement avec le numéro atomique uniquement chez les bactéries (*V. fischeri*) et les algues (*P. subcapitata*).
4. Des études écotoxicologiques des REEs supplémentaires sont nécessaires avant d'établir un schéma général de toxicité.

Bilan – Perspectives de développement

Grâce aux connaissances et compétences ainsi développées, le LIEC émerge dans de nouveaux programmes et s'enrichit de nouvelles collaborations :

- Réseau **Lorlux** : Lorraine – Luxembourg
 - **COST**: European cooperation in science and technology
 - **Workshop on Mineral-Microbe** interactions in concentration and fractionation of rare earth elements (Contact Simon Gregory, British Geological Survey, Nottingham UK)
- Les travaux menés dans le cadre de ce contrat post doctoral constituent un premier socle de connaissances sur l'écotoxicité des lanthanides permettant au laboratoire de répondre à un appel d'offre de l'ANR 2013 dans ce domaine de compétence en collaboration avec le Centre de recherche public Gabriel Lippmann



ECOSCOPE

Plate-forme expérimentale en écologie et écotoxicologie des milieux aquatiques pour Observer – Expérimenter – Modéliser en conditions semi réelles

Simon Devin, Mickaël Danger, Christophe Pagnout, Florence Maunoury-Danger, Sandrine Pain-Devin, Philippe Wagner et Vincent Felten

Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux

Enjeux scientifiques

L'enjeu scientifique majeur de l'ECOSCOPE est de développer une approche d'évaluation des risques environnementaux sur du long terme (> 3 mois), à des concentrations réalistes du point de vue de l'environnement.

Ce dispositif permettra :

De simuler et renforcer les synergies en matière de physico-chimie, d'écotoxicologie et d'écologie :

- en intégrant la variabilité de l'environnement naturel comme paramètre d'interprétation des résultats
- en permettant l'étude du comportement des contaminants dans le milieu naturel

D'affiner notre compréhension des interactions entre le fonctionnement des écosystèmes et les effets liés aux contaminations

De participer à la mise en place de nouvelles méthodes d'évaluation du risque et au développement d'outils de diagnostic prévisionnels pertinents



Etat d'avancement

L'ensemble des équipements est acheté (financement ZAM, CNRS, UL)

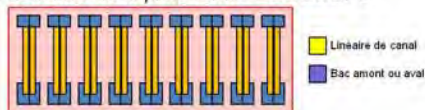
La dalle est achevée depuis octobre (financement LABEX, ZAM)

Il reste à monter les canaux, mettre en place les sondes et aménager la salle de pilotage de la plate-forme

L'ECOSCOPE devrait être complètement opérationnel pour la fin du printemps 2014

Les canaux ont déjà été testés dans une approche de dérivation de ruisseau *in situ*

Vue aérienne de la plate-forme ECOSCOPE



Vue latérale d'un canal expérimental



Description technique

- 18 canaux de 3,5m de long et de section 0,25 x 0,25
- Doublure en bâche EPDM changée à chaque expérience
- Contrôle de la nature du substrat et de la mosaïque d'habitat
- **Réservoir amont** : Introduction toxique, brassage, régulation °C
- **Divisible** en 3 sous-parties de 0.95 m
- Circulation d'eau en **circuit fermé**: pompe immergée à débit réglable
- **Equipés en sondes** T°, pH, O₂, conductivité
- **Coût total** : 225 k€ HT ; Financement LABEX : 110 k€ HT

Bilan – Perspectives de développement

Potentiel fédérateur important, à l'échelle de la Zone Atelier Moselle notamment

→Projet ANR ICARE déposé cette année

→ Autres projets à construire

Vitrine scientifique :

- Dispositif rare à l'échelle nationale
- Utilisation dans le cadre de la Fête de la Science
- Manifestation d'intérêt par Hydréos
- Excellence des filières d'enseignement : dispositif utilisé en TP

Projet réalisé par des entreprises lorraines :

Design des canaux par ISMA (57) et PSV (88), Instrumentation par CTB Choffel (88), BTP par ARDIZIO et SNEF (57)

Impacts cellulaires de l'acide gadotérique (agent de contraste gadoliné) sur des cellules humaines en culture (HEK 293T)

PARANT Marc, PETIT Elisabeth, SOHM Bénédicte, BATTAGLIA Eric
Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux - LIEC

Enjeux scientifiques

Quels sont les risques biologiques associés à l'utilisation de terres rares dans des produits manufacturés ?
L'impact biologique de tels composés dans leurs conditions d'accumulation environnementale nécessite-t-il la prise en compte de précautions lors de leur utilisation ?
Ces questions s'appliquent aujourd'hui aux agents de contraste gadolinés qui après plus de 20 ans d'utilisation dans le secteur du diagnostic médical sans aucun contrôle de leurs rejets sont aujourd'hui présents dans les différents compartiments aquatiques de l'environnement y compris parfois l'eau du robinet.

Etat de l'art

Depuis 1988, date du début de leur utilisation, les agents de contraste gadolinés ont été optimisés afin de gagner en efficacité et en sécurité pour le patient lors de l'examen de diagnostic médical.

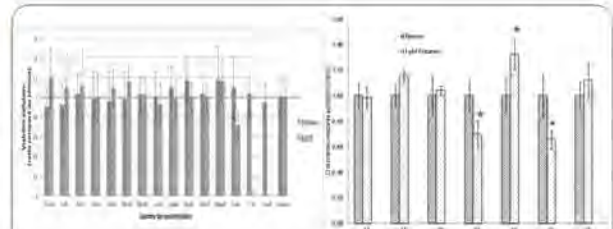
Aucune approche ne s'est cependant intéressée à l'action de ces composés sur la matière vivante dans les conditions qui résultent de leur rejets dans l'environnement, conditions très différentes de l'examen en concentration et en biodisponibilité.

Cycle du gadolinium dans l'environnement suite à son utilisation dans le milieu médical



Approche méthodologique

L'objectif de ce projet est de suivre l'impact de l'agent de contraste le plus retrouvé dans l'environnement (acide gadotérique, - DOTAREM®) sur la matière vivante. Pour ce faire nous avons suivi l'impact de ce composé sur la croissance de cellules humaines en culture (HEK 293T) en nous intéressant particulièrement aux concentrations présentes dans l'environnement dans le cas d'exposition aiguës ou chroniques.
Afin d'évaluer des variations concernant la progression du cycle cellulaire pendant la croissance, une approche par cytométrie en flux a été menée sur les situations les plus intéressantes. Une étude de bioaccumulation du gadolinium sur ces cellules a été menée après 48 h d'exposition à l'acide gadotérique 1µM.



Impact du Dotarem® et du chlorure de gadolinium sur la viabilité des cellules HEK293T après 48h d'exposition
Les cellules HEK293T ont été ensemencées dans des plaques 96 puits à hauteur de 2500 cellules par puits. Après 24h d'incubation, elles sont exposées durant deux jours à différentes concentrations de Dotarem® ou de GdCl₃. La mesure de viabilité est réalisée par un test MTT. Cette expérience a été répétée trois fois. La viabilité moyenne par rapport au témoin est présentée ci-dessus.

Suivi de croissance cellulaire durant une exposition chronique à 1 µM de Dotarem®
La quantité des cellules HEK293T a été évaluée par comptage après chaque repiquage au cours d'une exposition chronique à 1 µM de Dotarem®. La quantité moyenne de cellule est rapportée à celle du témoin. Aucune variation n'est observée avant 14 jours. * : différence significative par rapport au témoin (test t de Student, p<0.05, n=3)

Résultats

Pas de modification significative de la croissance de cellules HEK 293T (par comptage, test MTT ou test d'induction de prolifération) en présence d'acide gadotérique quelque soit la concentration utilisée en situation d'exposition aiguë.

En situation d'exposition chronique (1µM d'acide gadotérique, culture de cellules HEK 293T sur 35 jours), la croissance n'est pas significativement modifiée mais laisse apparaître une plus grande variabilité au-delà de 20 jours de culture, suggérant des conditions perturbantes pour les cellules. Aucune modification des phases G0/G1 ou G2/M n'a été observée par cytométrie en flux lors des situations perturbées.

Une faible fraction de gadolinium est retrouvée dans la fraction cellulaire après 48h d'exposition à 1 µM d'acide gadotérique. Ces résultats suggèrent soit une fixation membranaire forte, soit une internalisation de l'acide gadotérique ou de l'ion gadolinium seul et méritent d'être approfondis.

Bilan – Perspectives de développement

Ces premiers travaux ont permis d'établir des collaborations avec :
- L'Institut de Chimie Moléculaire de Reims - ICMR – UMR 7312 – Groupe Chimie de Coordination – Pr Françoise Chuburu,
- Le laboratoire d'hydrologie de Nancy ANSES (J-F Munoz – J-S Py)
- Le Centre de Recherche Gabriel Lippmann Luxembourg (C. Guignard).

Les collaborations se développent aujourd'hui sous la forme :
- d'une thèse initiée en Octobre 2013 (co-financement Région Lorraine – Ressources 21)
- d'un projet EC2CO soumis en septembre 2013
- d'une participation au développement d'un projet ANR piloté par D. Vignati.



Effets des nanoparticules d'argent sur *Gammarus sp.* (Amphipoda) et sur ses fonctions au niveau écosystémique.

Andreï Jennifer, Pain-Devin Sandrine, Guérold François, Felten Vincent & Giambérini Laure
LIEC, CNRS-UMR 7360, Université de Lorraine, rue du General Delestraint, 57070 Metz, France

Enjeux scientifiques

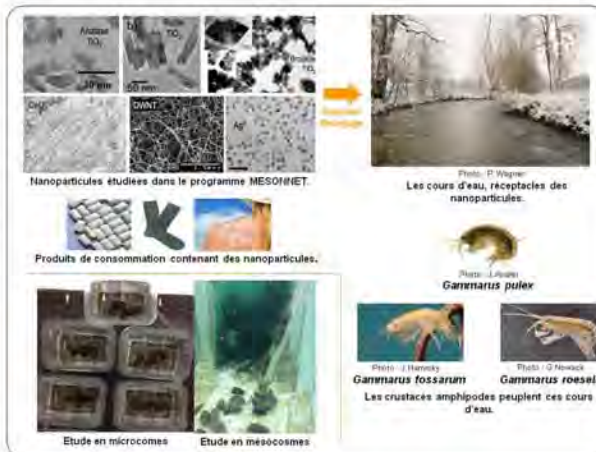
Malgré une dispersion dans l'environnement indétectable et des conséquences encore inconnues, les nanoparticules sont produites et couramment utilisées dans la vie quotidienne.

Ce projet se positionne au sein du Labex pour une évaluation des impacts écologiques de ces nanoparticules désormais potentiellement présentes dans les cours d'eau en quantité non naturelle. Il pourrait mettre en évidence des scénarios d'effet généraux de ces composés pour permettre une évaluation du risque et une politique de relargage adaptée.

Etat de l'art

Les nanoparticules sont des amas de quelques milliers d'atomes. Leur taille nanométrique leur confère parfois des propriétés inédites et étonnantes. Elles sont par exemple utilisées pour leur pouvoir blanchissant ($nTiO_2$) ou encore bactéricide (nAg).

Intégrateurs de l'état de l'écosystème qu'ils colonisent, les gammarus sont de bons bioindicateurs de la qualité d'un cours d'eau. L'analyse d'impact se fait alors par l'étude de biomarqueurs cellulaires, physiologiques et comportementaux.



Résultats

Evolution des niveaux de contamination à 72h:

- Perte d'Ag issu $AgNO_3$ (~70%) >> AgNp (~40%)
 - Perte d'AgNp à 0,5µg/l (60%) >>>> AgNp à 5µg/l (10%)
- L'argent sous ces deux formes peut subir des modifications dans le milieu naturel.

Effet des AgNp après 72h d'exposition:

- Pas de mortalité à des [Ag] environnementalement réalistes
 - Pas de modification de l'activité de défense multixénobiotique MXR, mais tendance à la baisse (inhibition?, dégradation) pour 5µg/l d'AgNp de 10nm de diamètre.
 - Réduction significative de l'activité locomotrice et une meilleure assimilation.
- L'impact de l'argent nanoparticulaire semble équivalent à celui de l'argent dissous.

Bilan – Perspectives de développement

Après des études déjà réalisées sur *Gammarus sp.* et l'argent dissous (Thèse J. Arce Funck), ce projet a permis d'approfondir et de compléter nos connaissances sur les risques liés à une contamination argentique. L'étude d'impacts à des échelles d'intégration supérieures présente une forte originalité dans le « monde des nanoparticules » plutôt habitué à évaluer leurs effets au travers de la mortalité des organismes.

Ce projet permet donc de considérer et d'accroître l'aspect écologique des questionnements actuels, de rajouter du éco dans écotoxicologie et ainsi d'avoir une meilleure vision des risques globaux que peuvent induire les nanoparticules.

C'est dans ce sens que seront développés l'ensemble des travaux afin de répondre aux objectifs du Labex ainsi que des laboratoires d'OTeLo.

Impact environnemental – PRA3

Approche méthodologique

Appartenant au programme MESONNET, cette thèse a pour objectif d'évaluer les impacts des nanoparticules sur le crustacé *Gammarus sp.*, qui présente un rôle important dans le fonctionnement des écosystèmes aquatiques.

Les premiers travaux ont permis d'optimiser des conditions expérimentales les plus « environnementalement réalistes ». Le maintien d'une pression de contamination dans une eau naturelle (Méholle) a été testé avant d'entreprendre des expériences d'exposition des organismes de 72h à 3 semaines.



Conseil Scientifique du 20/01/2014
Rapport annuel ANR 2014



UNIVERSITÉ DE LORRAINE



INRA

Zegeye Asfaw, Patrick Billard, Christian Mustin

LIEC, CNRS UMR 7360, Université de Lorraine. Faculté des Sciences, BP 70239, 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy, France

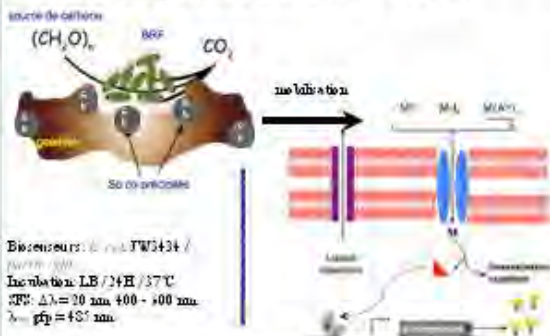
Introduction

L'antimoine est le neuvième métal le plus exploité à des fins industrielles (alliages anti-friction, des plombs de chasse, ignifugeant...) même s'il est considéré comme un polluant prioritaire (5 µg L⁻¹ pour la potabilité de l'eau, EUC, 1998). Dans l'environnement, l'antimoine interagit avec les oxydes de fer soit en se substituant à la surface du minéral soit en se substituant au fer dans la structure cristalline ce qui pourrait réduire sa mobilité. Toutefois, des études approfondies sont encore nécessaires avant de considérer le piégeage de l'antimoine par les oxydes de fer comme un moyen pérenne de mobilisation de l'antimoine. L'objectif de ce travail était de synthétiser des goethites substituées par l'antimoine et d'étudier la mobilisation biochimique du métal inclus dans le minéral et d'en évaluer la fraction biodisponible via l'utilisation de biosenseurs bactériens.

Approche méthodologique

Synthèse de goethite-Sb (1) co-précipitation de Fe(NO₃), (K₂[Sb(OH)₆]) par du KOH et vieillissement à 70°C pendant 72h → goeth-Fe-Sb (2) co-précipitation de (Fe(NO₃), (K₂[Sb(OH)₆]) par du NaOH et vieillissement à 70°C pendant 72h → goeth-Gr-Sb

Bioréduction : une bactérie capable de Fe³⁺ (BRF) ou anaérobie : *S. putrefaciens* (10⁷ CFU mL⁻¹)
Source d'électrons = succinate, sulfure d'hydrogène = MCOB, pH = 7.2, T°C = 25.



Bioreacteur : Bioreactor TW5434 / Sartorius
Incubation LB / 24h / 37°C
SPF: Δλ = 20 nm 400 - 600 nm
λ_{exc} = 487 nm

Spectre de fluorescence Synchronisé (SFS)

Traitement du signal

$$S(\lambda, \lambda) = \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\lambda_i} \cdot s(\lambda)$$

Résultats

Caractérisation des minéraux synthétisés

Échantillon	Longueur de cohérence (Å)	Substitution (%)
goeth-Fe	444	
goeth-Fe-Sb	340	65
goeth-Gr	341	
goeth-Gr-Sb	235	55

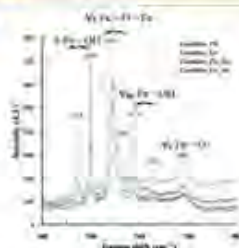


Fig. 1. XRD patterns of synthesized goethite (Fe), goethite-Sb (65%) and goethite-Gr (55%). The patterns were recorded using a Siemens Kristalloflex D5000 X-ray diffractometer with CuKα radiation (λ = 1.5418 Å) at 40 kV and 15 mA. The scanning rate was 2° min⁻¹.

Fig. 2. XRD patterns of synthesized goethite (Fe), goethite-Sb (65%) and goethite-Gr (55%). The patterns were recorded using a Siemens Kristalloflex D5000 X-ray diffractometer with CuKα radiation (λ = 1.5418 Å) at 40 kV and 15 mA. The scanning rate was 2° min⁻¹.

Bioréduction des goethites substituées

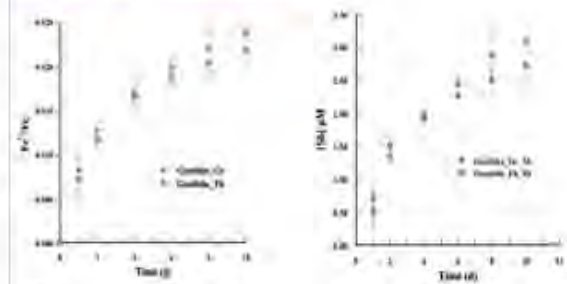


Fig. 3. Bioreduction of substituted goethites by *S. putrefaciens* (10⁷ CFU mL⁻¹) using succinate as electron donor.

Fig. 4. Bioreduction of substituted goethites by *S. putrefaciens* (10⁷ CFU mL⁻¹) using MCOB as electron donor.

- * faible vitesse et faible taux de réduction des goethites substituées → Fe structural peu labile malgré les substitutions.
- * même profil et faible mobilisation (> 3 µM) de l'antimoine quelque soit le % de substitution après 10 jours de réduction.

Biodisponibilité de l'antimoine

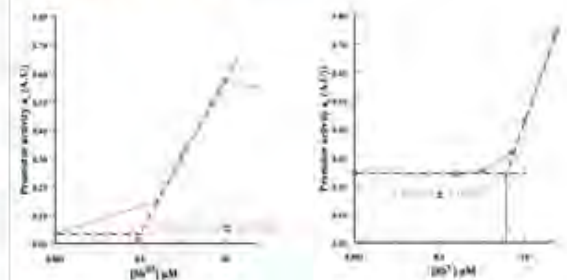


Fig. 5. Bioavailability of antimony (Sb³⁺) released by *S. putrefaciens* (10⁷ CFU mL⁻¹) using succinate as electron donor. The patterns were recorded using a Siemens Kristalloflex D5000 X-ray diffractometer with CuKα radiation (λ = 1.5418 Å) at 40 kV and 15 mA. The scanning rate was 2° min⁻¹.

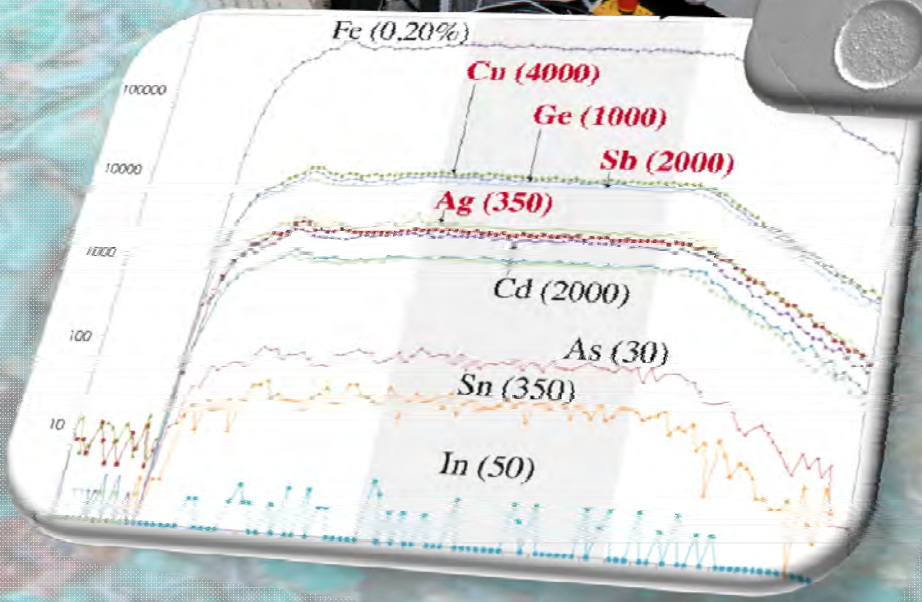
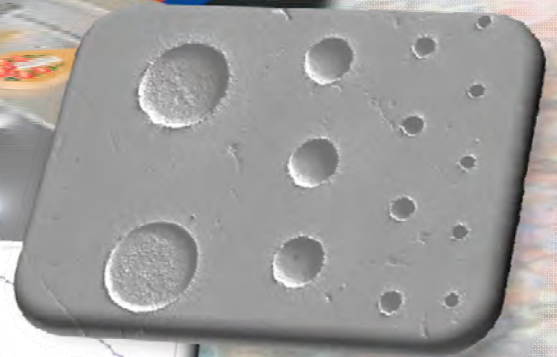
- * promoteur *pArs* sensible à l'antimonite et à l'antimonate (Sb³⁺ et Sb⁵⁺).
- * limite de dosabilité ou de détection > 0.10 µM et 3 µM pour Sb³⁺ et Sb⁵⁺.
- * promoteur *pArs* plus sensible à la forme trivalente.

Perspectives

- * Conception de biosenseurs actifs (i.e. ferri-réducteur et anaérobie) : *S. putrefaciens* / *ovoidensis pArs::acfbfp* pour étudier in situ la mobilisation de l'antimoine lors de la bioréduction d'oxydes de fer substitués.
- * Développer de biosenseurs pour la détection multiples de mélanges de métaux stratégiques Ni / Co / As en utilisant plusieurs protéines fluorescentes.
- * Tester et valider la robustesse des biosenseurs dans le cadre de contaminations minières poly-métalliques.



5 BIBLIOGRAPHIE



Masters – Thèses - Publications et Communications scientifiques 2012-2013

Géologie et Genèse des concentrations minérales - PRA1 et Frontières analytiques –PRA4

Masters soutenus en 2012 rattachés à PRA1

AOUA Mariette : Les éléments en traces dans l'apatite (U, terres rares) comme marqueurs des conditions de formation, G2R, M. Cathelineau, C. Peiffert, en coll. MC Boiron, M. Cuney, P. Lach, et J. Reyx, M. Brouand (Areva)

BELISSONT Rémi, Traçage élémentaire et isotopique du germanium dans les sulfures (LA ICP-MS et MC-ICPMS), G2R-CRPG, M-C Boiron, B. Luais, **Master Labex R21**

DROUET Sylvain, Fractionnements de l'uranium à la limite Archéen - Protérozoïque. L'exemple du Nord Québec, G2R, M. Cuney

ESCARIO Sofia, Origine des minéralisations en fluorine de l'Est de la France. G2R, M. Cathelineau, T. Blaise, M-C Boiron

FORTUNATO Jolanda, Les calcrettes de Trekkopje, Namibie, G2R, M. Cuney et F. Malartre.

FONTAINE Arnaud, Gisement aurifère du craton Ouest-Africain, Contraintes sur le timing

aurifère par méthode Re/Os, G2R et CRPG, Anne-Sylvie Andre-Mayer et Laurie Reisberg, **Master Labex R21**

FROMAGEOT Augustin, Or primaire vs or secondaire dans les gisements associés aux shear zones de St Elie, Guyane française" G2R, M-C Boiron, M. Cathelineau.

GAILLARD Nicolas, Les concentrations en or et uranium dans les niveaux de calc-silicates du Nord de la Finlande (Rovaniemi), G2R, M. Cathelineau, M-C Boiron, M.Cuney

HARLAUX Matthieu, Caractérisation des paragenèses garniéritiques et chronologie relative de mise en place dans les saprolites nickélifères de Nouvelle-Calédonie, G2R, M. Cathelineau, **Master Labex R21**

MAGOTT Rémi : Etude pétrologique et étude des inclusions fluides d'échantillons du socle dans le Bassin de Thelon au Canada. G2R, M. Cuney

Masters soutenus en 2013 rattachés à PRA1

BOUDOIRE Guillaume, Nouvelles contraintes sur l'immiscibilité des magmas et sur la plomberie de l'Oldoinyo Lengai, CRPG, Lydéric France

FERRAINA Clément, Etude d'inclusions fluides associées aux minéralisations uranifères synmétamorphiques Pan-Africaines, Ceinture Lufilienne, Zambie. GéoRessources, A. Tarantola, A Eglinger

FREMONT François, Analyse pétrostructurale et géochronologique des schistes et gneiss du dôme de Mwombwezhi : croissance et remaniement de la croûte orogénique de la zone interne de la ceinture du Lufilien, Zambie. GéoRessources, O. Vanderhaeghe

GROULIER Pierre-Arthur, Le système minéralisé en Nb-Ta-REE du gîte associé à l'intrusion alcaline de CREVIER (province du Grenville, Québec), GéoRessources, AS André-Mayer, D. Ohnenstetter, **Master Labex R21**

KEITA Mawaraba, Développement des capacités d'analyse par microthermométrie des inclusions

fluides piégées dans les minéraux opaques, GéoRessources, Jean Cauzid.

LEBRUN Charline, Etude de la minéralisation en antimoine et de sa distribution dans un gisement d'or orogénique: cas de Lapa, Abitibi. Université du Québec à Montréal, M. Jebrak,

MASSEI Frédéric, Talc-like et serpentines : Etude paragenétique et cristallogénique par spectroscopie Raman. GéoRessources, M. Cathelineau. **Master Labex R21**

SCHEFFER Christophe, Reconstruction des paléocirculations et géochimie des paléofluides dans le Laurion (Grèce). Implications géodynamiques et métallogéniques, GéoRessources, A. Tarantola, O. Vanderhaeghe.

ROMEO Benjamin, Etude des circulations fluides dans le gisement de Puy-les-Vignes, Massif Central Français. GéoRessources, M. Cuney, C. Marignac. **Master Labex R21**

Thèses en cours

- BELISSONT Rémi, Cycle du Germanium et éléments accompagnateurs dans les concentrations métalliques : Traçage élémentaire, isotopique et approche expérimentale Encadrants : MC. Boiron, B. Luais, M. Cathelineau, **Thèse Labex R21** et région Lorraine, 2012- 2015
- HARLAUX Mathieu, Les minéralisations tardi-orogéniques varisques à tungstène et métaux associés (Sn, Nb, Ta) : source des fluides et des métaux, relations avec les événements tectonomagmatiques fini-carbonifères sur l'exemple de gisements du massif central français. Encadrants M. Cuney – codirection, C. Marignac, J. Mercadier. **Thèse Labex R21**-Carnot ICEEL, 2013- 2016
- MOLLEX Gaele, Les concentrations en Terres Rares dans les carbonatites : exemple de l'Oldoinyo Lengai, Tanzanie. Direction L. France et P. Burnard, **Thèse Labex R21** et région Lorraine, 2013- 2016
- LECOMTE Andrei, Relations spatiales et génétiques entre uranium, sulfures et matières organiques : application aux shales et schistes noirs, soutenance janvier 2014, Thèse CARNOT ICEEL
- DYJA Vanessa, Interaction entre fluides de différents réservoirs lors de l'évolution d'un prisme orogénique en contexte de déformation partitionnée : les Cordillères bétiques internes (Espagne). Implications sur le transfert de métaux dans la croûte. Soutenance mars 2014. Thèse MNESR
- BONNET Julien, Cycle géologique et processus métallogéniques de métaux rares (Ge, Ga, I). Inter-Carnot ICEEL et BRGM. Encadrant : A.S. André – Mayer, Co-encadrants L. Bailly et J. Cauzid, Thèse Carnot ICEEL-BRGM, 2011-2014.
- LE MIGNOT Elodie, L'or Ouest Africain : Marqueur d'un transfert majeur manteau-croûte. WAXI. Encadrant : A.S. André – Mayer, Co-encadrante L. Reisberg. Thèse MNESR, 2011-2014.
- DARGENT Maxime, Etude expérimentale de la spéciation des ions uranyles en solutions chlorurées acides et de la cinétique de précipitation de l'uraninite par réduction (H₂, CH₄, C, H₂S). Encadrants : J. Dubessy et L. Truche, financement Carnot, 2011-2014.
- DIONDOH Sandrine, Contexte géologique et géodynamique des minéralisations Au et U de la ceinture panafricaine d'Afrique centrale dans le massif du Mayo Kebbi (Tchad). Encadrant : Encadrants : A.S. André – Mayer, O. Vanderhaeghe, 2010-2014.
- HAFEZNIA Yaser, Minéralisations de Sainte-Marie aux Mines, Encadrants : M. Ohnenstetter et S. Bourlange, 2010-2014.
- MAMANE Marah, Les gisements d'uranium du Niger, synthèse métallogénique, Direction M. Cathelineau, 2013- 2016
- CARROUE Simon. Genèse des granites potassiques archéens riches en uranium dans la ceinture de Barbeton, direction Jean François Moyen – codirection, M. Cuney. Thèse Univ. St Etienne.

Thèses soutenues

- FLEURANCE Stéphanie, 2012, Métallogénèse de l'uranium associée à des processus superficiels : l'exemple de la Jordanie centrale, Thèse soutenue le 13 décembre 2012, Directeurs de thèse : M. Cuney et F. Malartre
- LACH Philippe, 2012, Signature géochimique des éléments des terres rares dans les oxydes d'uranium et minéraux associés dans les gisements d'uranium : analyse par ablation laser couplée à l'ICP-MS et étude géochronologique. Thèse soutenue le 7 décembre 2012, Directeurs de thèse : M. Cuney, J. Dubessy et MC Boiron
- MUNARA Askar, 2012, Formation des gisements d'uranium de type roll : approche minéralogique et géochimique du gisement uranifère de Muyunkum (Bassin de Chu-Sarysu, Kazakhstan). Thèse soutenue le 9 Juillet 2012, Directeurs de thèse : Michel Cathelineau, Cédric Carpentier
- TOE Wilfried Antoine Bassou, 2012, Minéralisations uranifères de la ceinture orogénique Pan-Africaine du Damara (Namibie) : implications à la fusion partielle, de la migration et de la mise en place des magmas sur le remaniement de la croûte continentale. Thèse soutenue le 11 décembre 2012, Directeurs de thèse : AS Andre-Mayer et O. Vandehaeghe.
- BONNETTI Christophe, 2013 Genèse des gisements d'uranium associés aux bassins sédimentaires continentaux. L'exemple du bassin d'Erlan (Chine). Thèse université de Lorraine -Nancy (Bourse AREVA), direction M. Cuney, S. Bourlange, F. Malartre (13 Décembre 2013)

EGLINGER Aurelien, 2013 Cycle de l'uranium et évolution tectono-métamorphique de la ceinture orogénique Pan-Africaine du Lufilien (Zambie).

Post-doctorants

ULRICH Marc- Le scandium dans les latérites. Post-doc Labex Ressources 21 (Sept 2012-Sept 2013)

LI Guanglai, 2 mois, granites et minéralisations à métaux rares du SE de la Chine : Financement East China Institute of Technology Fuzhou et complément de financement par le Labex R21 (hébergement à Nancy).

Publications 2012

André-Mayer A.S. and Sausse J. (2012) Fissural permeability in the Roşia Poieni copper deposit: Influence on ore repartition at the open pit scale. *Romanian Journal of Earth Sciences*, vol. 86, issue 1, p. 1-15.

Abidi, R; Slim-Shimi, N; Marignac, C; Hatira, NI; Gasquet, D; Renac, C; Soumarin, A. Gleeson, S., 2012, The origin of sulfate mineralization and the nature of the BaSO₄-SrSO₄ solid-solution series in the Ain Allega and El Aguiba ore deposits, Northern Tunisia. *Ore Geology Reviews*, 48, 165-179.

Berkesi, M; Guzmics, T; Szabo, C; Dubessy, J; Bodnar, RJ; Hidas, K; Ratter, K (2012) The role of CO₂-rich fluids in trace element transport and metasomatism in the lithospheric mantle beneath the Central Pannonian Basin, Hungary, based on fluid inclusions in mantle xenoliths. *Earth and Planetary Science Letters*, 331, 8- 20. DOI : 10.1016/j.epsl.2012.03.012

Cathelineau M., Boiron M.C., Fourcade S., Ruffet G., Clauer N., Belcourt O, Coulibaly Y., Banks D. A., Guillocheau F., 2012. A Kimmeridgian to Berriasian major fluid event at the basin/basement unconformity in western France: ³⁹Ar-⁴⁰Ar and K-Ar dating, fluid chemistry, and related geodynamic context. *Chemical Geology*, 322-323, 99-120.

Carbone, C; Marescotti, P; Lucchetti, G; Martinelli, A; Basso, R; Cauzid, J (2012) Migration of selected elements of environmental concern from unaltered pyrite-rich mineralizations to Fe-rich alteration crusts. *Journal of geochemical exploration*, 114, 109- 117.

Chattaraj, P.K., Das, R., Duley, S. & Vigneresse, J.L., 2012. Structure-stability diagrams and stability-reactivity landscapes: a conceptual DFT study. *Theoretical Chemical Acta* 131, 1089, DOI 10.1007/s00214-012-1089-y

Cuney M., Emetz A., Mercadier J., Mykchaylov V., Shunko V., Yuslenko A. 2012, Uranium

direction: A.S. André – Mayer, O. Vanderhaeghe, bourse MNESR, Thèse Université de Lorraine, 13 décembre 2013

GAAFAR Ibrahim: 6 mois, Granites et minéralisations à métaux rares du Désert de l'Est d'Egypte, financement par son organisme la Nuclear Materail Authority.

Chercheur invitée: Elena BAZARKINA - financement ANR H2 de Jean Dubessy et contrat Andra.

deposits associated with Na-metasomatism from central Ukraine : a review of some of the major deposits and genetic constraints. *Ore Geology Reviews*, 44, 82-106.

Deschamps, F ; Godard, M. ; Guillot, S. ; Chauvel, C. ; Andreani, M. ; Hattori, K. ; Wunder, B. ; France, L. 2012, Behavior of fluid-mobile elements in serpentines from abyssal to subduction environments : Examples from Cuba and Dominican Republic, *Chemical Geology*, 312-313, 93-117

Duley, S; Vigneresse, JL; Chattaraj, PK (2012) Fitness landscapes in natural rocks system evolution: A conceptual DFT treatment. *JOURNAL OF Chemical Sciences*, 124, 29- 34.

Escoube, R. ; Rouxel, O. ; Luais, B. ; Ponzevera, E. ; Donard, O., 2012, An intercomparison study of the germanium isotope composition of geological reference materials, *Geostandards and Geoanalytical Research*, 36, 2, 149-159

Feneyrol, J. ; Onhenstetter, D. ; Giuliani, G. ; Fallick, A.E. ; Rollion-Bard, C. ; Robert, J.L. ; Malisa, E.P., 2012, Evidence of evaporites in the genesis of the vanadian grossular 'tsavorite' deposit in Namalulu, Tanzania ; *The Canadian Mineralogist*, 50, 745-769

Huber, C; Bachmann, O; Vigneresse, JL; Dufek, J; Parmigiani, A., 2012, A physical model for metal extraction and transport in shallow magmatic systems. *Geochemistry Geophysics Geosystems* (2012) 13.

Isseini M. , André-Mayer A. S., Vanderhaeghe O., Barbey P., Deloule E., 2012, A-type granites from the Pan-African orogenic belt in south-western Chad constrained using geochemistry, Sr–Nd isotopes and U–Pb geochronology *Original Research Article Lithos*, Volume 153, 39-52

Leisen M., Boiron M.C., Richard A., Dubessy J., 2012, Determination of Cl and Br concentrations in individual fluid inclusions by

- combining microthermometry and LA-ICPMS analysis: Implications for the origin of salinity in crustal fluids. *Chemical Geology*, 330-331, 197-206.
- Leisen M., Dubessy J., Boiron M.C., Lach P., 2012. Improvement of the determination of element concentrations in quartz-hosted fluid inclusions by LA-ICP-MS and Pitzer thermodynamic modeling of ice melting temperature. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 90, 110-125.
- Lemarchand J., Boulvais Ph., Gaboriau M., Boiron M.C., Tartèse R., Cokkinos M., Bonnet S. 2012, Giant quartz vein formation and high-elevation meteoric fluid infiltration into the South Armorican Shear Zone : geological, fluid inclusion and stable isotope evidence. *Journal of the Geological Society, London*, 169, 17-27.
- Luais, B., 2012, Germanium chemistry and MC-ICPMS isotopic measurements of Fe–Ni, Zn alloys and silicate matrices : Insights into deep Earth processes. *Chemical Geology*, 334, 295–311.
- Mercadier, J; Richard, A; Cathelineau, M., 2012, Boron- and magnesium-rich marine brines at the origin of giant unconformity-related uranium deposits: delta B-11 evidence from Mg-tourmalines. *Geology*, 40, 231-234.
- Richard A., Rozsypal C., Mercadier J., Banks D.A., Cuney M., Boiron M.C., Cathelineau M., 2012. Giant uranium deposits originate from exceptionally U-rich brines. *Nature Geoscience*, 5, 142-146.
- Sadequi, M., Bouabdellah, M., Boushaba, A., Marcoux, E., Cheilletz, A., 2012, Mineralogy, fluid inclusion, and oxygen isotope constraints on the genesis of the Lalla Zahra W-(Cu) deposit, Alouana district, northeastern Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*, 2,
- Seydoux-Guillaume A. M., , Montel J. M., Bingen B., Bosse V., , de Parseval P. , Paquette J.L., Janots E., Wirth R., 2012, Low-temperature alteration of monazite: Fluid mediated coupled dissolution–precipitation, irradiation damage, and disturbance of the U–Pb and Th–Pb chronometers. *Chemical Geology*, Volumes 330–331, 140-158
- Solovova, IP; Ohnenstetter, D; Girnis, AV., 2012, Melt inclusions in olivine from the boninites of New Caledonia: Postentrapment melt modification and estimation of primary magma compositions. *Petrology*, 20, 529-544.
- Sun, R; Dubessy, J., 2012, Prediction of vapor-liquid equilibrium and PVTx properties of geological fluid system with SAFT-LJ EOS including multi-polar contribution. Part II: Application to H2O-NaCl and CO2-H2O-NaCl System. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 88, 130-145
- Tarantola, A; Diamond, LW; Stunitz, H; Thust, A; Pec, M., 2012, Modification of fluid inclusions in quartz by deviatoric stress. III: Influence of principal stresses on inclusion density and orientation. *Contributions to mineralogy and petrology*, 164, 537-550
- Uher, P; Giuliani, G; Szakall, S; Fallick, A; Strunga, V; Vaculovic, T; Ozdin, D; Greganova, M., 2012, Sapphires related to alkali basalts from the Cerova Highlands, Western Carpathians (southern Slovakia): composition and origin. *Geologica Carpathica*, 63, 71-82
- Vanderhaeghe O. 2012, Thermal-mechanical evolution of orogenic belts at convergent plate boundaries: a reappraisal of the orogenic cycle, *Journal of Geodynamics*, 56-57 pp. 124-145.
- Vigneressse J. L., 2012, Chemical reactivity parameters (HSAB) applied to magma evolution and ore formation. *Lithos*, Volume 153, Pages 154-164.

Ouvrage

- Morteani G., Eichinger F., Götze J., Tarantola A., and Müller A. (2012) Evaluation of the potential of the pegmatitic quartz veins of the Sierra de Comechigones (Argentina) as a source of high purity quartz by a combination of LA-ICP-MS, ICP, cathodoluminescence, gas chromatography, fluid inclusion analysis, Raman and FTIR spectroscopy. *Quartz: deposits, mineralogy and analytics in Springer Book*, DOI: 10.1007/978-3-642-22161-3_5, 119-137.

Publications 2013

- Belissant, R., Boiron, M-C., Luais, B., Cathelineau, M., LA-ICP-MS analyses of minor and trace elements and bulk Ge isotopes in zoned Gerich sphalerites from the Noailhac – Saint-Salvy deposit (France): Insights on incorporation mechanisms and ore deposition processes, *Geochim. Cosmochim. Acta*, doi /<http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2013.10.052>
- Berger, J., H. Diot, L. Khalidou, D. Ohnenstetter, O. Féménias, M. Pivin, D. Demaiffe, A. Bernard, and B. Charlier. 2013, Petrogenesis of Archean PGM-bearing chromitites and associated ultramafic–mafic–anorthositic rocks from the Guelb el Azib layered complex (West African craton, Mauritania). *Precambrian Research* 224 (2013): 612–628.
- Blaise T., Barbarand, J., Kars M., Ploquin F. Aubourg Ch. Brigaud B., Cathelineau M. El Albani, A., Gautheron C., Izart A., Janots D., Michels R., Pagel M., Pozzi JP, Boiron MC

- Landrein Ph. (2013) Reconstruction of low burial (< 100 °C) in sedimentary basins: A comparison of geothermometer sensitivity in the intracontinental Paris Basin, *Marine and Petroleum Geology*, sous presse
- Bonnetti, C., Malartre, F., Huault V., Cuney, M., Bourlange, S., Liu, X., Peng, Y. (2013) Sedimentology, stratigraphy and palynological record of the late Cretaceous Erlian Formation, Erlian Basin, Inner Mongolia, People's Republic of China. *Cretaceous Research*, accepté.
- Caumon, M.-C., Dubessy, J., Robert, P. and Tarantola, A., (2013) Fused-silica capillary capsules (FSCCs) as reference synthetic aqueous fluid inclusions to determine chlorinity by Raman spectroscopy. *Eur. J. Mineral.*, 25: DOI: 10.1127/0935-1221/2013/0025-2280.
- Cepedal A., Fuertes – Fuente M., Martin – Izard A., Garcia – Nieto J., Boiron M.C., 2013, An intrusion –related gold deposit (IRGD) in the NW of Spain, the Linares deposit : Igneous rocks, veins and related alterations, ore features and fluids involved. *Journal of Geochemical Exploration*, 124, 101–126.
- Conin M., Bourlange S., Henry P., Boiselet A., 2013, Distribution of resistive and conductive structures in Nankai accretionary wedge reveals contrasting stress paths, *Tectonophysics*
- Dargent M., Dubessy J., Truche L., Nguyen-Trung C., Robert P., 2013, Experimental study of uranyl(VI) chloride complex formation in acid LiCl aqueous solutions under hydrothermal conditions (T = 21 °C - 350 °C, Psat) using Raman spectroscopy. *Journal of European Mineralogy*, in press
- Decree, S; Marignac, C; De Putter, T; Yans, J; Clauer, N; Dermech, M; Aloui, K; Baele, JM., 2013, The Oued Belif Hematite-Rich Breccia: A Miocene Iron Oxide Cu-Au-(U-REE) Deposit in the Nefza Mining District, Tunisia. *Economic Geology*, 108, 1425- 1457.
- DemaiFFE, D., J. Wiszniewska, E. Krzeminska, I. S. Williams, S. Brassinnes, D. Ohnenstetter, and E. Deloule. 2013, A hidden alkaline and carbonatite province of early carboniferous age in northeast Poland : zircon U-Pb and pyrrhotite Re-Os geochronology. *Journal of the Geology* 121, 91–104.
- Devineau, K; Devouard, B; Leroux, H; Tissandier, L (2013) Incorporation of Zn in the destabilization products of muscovite at 1175 degrees C under disequilibrium conditions, and implications for heavy metal sequestration. *American Mineralogist*, 98, 932- 945. DOI : 10.2138/am.2013.4213
- Didier, A. Bosse, V; Boulvais, P; Bouloton, J; Paquette, JL; Montel, JM; Devidal, JL., 2013, Disturbance versus preservation of U-Th-Pb ages in monazite during fluid-rock interaction: textural, chemical and isotopic in situ study in microgranites (Velay Dome, France). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165, 1051- 1072. DOI : 10.1007/s00410-012-0847-0
- Eglinger, A., André-Mayer, A.S., Vanderhaeghe, O., Mercadier, J., Cuney, M., Decrée, S., Feybesse, J.L., Milesi, J.P. 2013, Geochemical signatures of uraninite: From unconformity to syn-metamorphic uranium deposits in the Panafrican Lufilian Copperbelt. *Ore Geol. Rev.*, 54, 197-213.
- Feneyrol, J. Giuliani, G., Ohnenstetter, D. Fallick, AE., Martelat, JE. Monie, P., Dubessy, J., Rollion-Bard, C; Le Goff, E; Malisa, E; Rakotondrazafy, AFM; Pardieu, V; Kahn, T; Ichangi, D; Venance, E; Voarintsoa, NR; Ranatsenho, MM; Simonet, C; Omito, E; Nya (2013) New aspects and perspectives on tsavorite deposits. *Ore Geology Reviews*, 53, 1- 25.
- Fleurance S., Cuney M., Malartre F. , Reyx, J., 2013, Origin of the extreme polymetallic enrichment (Cd, Cr, Mo, Ni, U, V, Zn) of the Late Cretaceous–Early Tertiary Belqa Group, central Jordan *Original Research Article Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 369- 1, 201-219.
- Lach P, Mercadier J., Dubessy J., Boiron M.C., Cuney M., 2013, In-situ quantitative measurement of rare earth elements in uranium oxides by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards and geoanalytical research*. 37, 277-296.
- Le Carlier, Ch., Alexandre, P., Ruffet, G. Cuney, M., Cheilletz, A. (2013). A two-stage exhumation in Western French Massif Central: new geochronological evidences of syn-collisional extension. *LITHOS*, 175, 1-15.
- Montel, JM; Giot, R (2013) Fracturing around radioactive minerals: elastic model and applications. *Physics And Chemistry Of Minerals*, 40, 635- 645.
- Pignatelli, I., Mugnaioli, E. Hybler, J. Mosser-Ruck, R. Cathelineau M. and Michau N. (2013) A multi-technique characterization of cronstedtite synthesized by iron–clay interaction in a step-by-step cooling procedure, *Clays and Clay Minerals*, Vol. 61, No. 4, 277–289, 2013
- Rasoamalala, V., Salvi, S., Béziat, D., Ursule, J.P., Cuney, M., Moine, B., Guillaume, D., Andriamampihantona, J. (2013) Geological setting of the bastnaesite and monazite deposits in the Ambatofinandrahana area,

central part of Madagascar: an overview. *Journal of African Earth Sciences*, accepté, en ligne

- Richard A., Cauzid J., Cathelineau M., Boiron M.C., Mercadier J., Cuney M., 2013, Synchrotron-XRF and XANES investigation of uranium speciation and element distribution in fluid inclusions from unconformity-related uranium deposits. *Geofluids*, 13,110-121.
- Richard, A., P. Boulvais, J. Mercadier, M. C. Boiron, M. Cathelineau, M. Cuney, and C. France-Lanord. "From evaporated seawater to uranium-mineralizing brines: Isotopic and trace element study of quartz–dolomite veins in the Athabasca system." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 113 (2013): 38–59.
- Siebenaller L., Boiron M.C., Vanderhaeghe O., Hirsch C., Jessell M., André-Mayer A.S., France-Lanord C., Photiades A. (2013) Fluid record of rock exhumation across the brittle-ductile transition during formation of a Metamorphic Core Complex (Naxos Island, Cyclades, Greece). *Journal of metamorphic geology*, 31, 313-338.
- Tartese, R; Boulvais, P; Poujol, M; Gloaguen, E; Cuney, M (2013) Uranium mobilization from the variscan Questembert syntectonic granite during fluid-rock interaction at depth. *Economic Geology*, 108, 379- 386.
- Toe W., Vanderhaeghe O. André-Mayer A.S., Feybesse J.L. and Milesi J.P. (2013) From migmatites to granites in the Panafrican Damara Belt. *Journal of African Earth Sciences*, 85, 62–74.
- Truche, L., Jodin-Caumon, M-C, Lerouge, C., Berger, G., Mosser-Ruck, R., Giffaut, E., Michau, N., (2013). Sulphide mineral reactions in clay-rich rock induced by high hydrogen pressure. Application to disturbed or natural settings up to 250°C and 30 bar. . *Chem. Geol.* 351, 217-228.
- Welsch, B., F. Faure, V. Famin, A. Baronnet, and P. Bachèlery. 2013, "Dentritic crystallization: A single process for all the textures of olivine in basalts?" *Journal of Petrology* 54, no. 3 539–574.

Communications scientifiques 2012

- André-Mayer A-S., Reisberg L., Vanderhaeghe O., Le Mignot E., Eglinger A., Fontaine A., Ramiandrisoa N. (2012) : Insights of geochronological constraints in the understanding of gold and uranium mineralizations in African Proterozoic orogen and their relation with continental crust formation and evolution. 4th International Geologica Belgica Meeting “Moving plates and melting icecaps. Processes and forcing factors in geology”. Session 13a, September 14th 2012
- André-Mayer A.S. (2012)- Key Note Speaker. Insights of geochronological constraints in the understanding of gold and uranium mineralizations in African Proterozoic orogen and their relation with continental crust formation and evolution. *Geologica Belgica*, Bruxelles, septembre 2012. Oral
- André- Mayer A.S., Sérov L., Afanasieva E., Cuney M., Lipner A., Brouand M., Mercadier J., Ledru P., Milési J.P., Kister Ph. and Mironov Y. (2012) Recyclage de l’uranium dans la croûte continentale. Exemple du district de Litsa, Péninsule de Kola, Russie. De Launay, Montréal, 7-8 mai 2012. Oral
- Blaise, T. , Clauer, N. Cathelineau, M. Boulvais, P. Boiron,MC , Techer,I. Tarantola, A. et Landrein P. (2012) Dating fluid flow events in a shallow sedimentary basin: the key contribution of K-Ar geochronology of authigenic illite. *Goldschmidt conf.* 24-29 juin, Montreal, Canada,
- Blaise, T., Cathelineau, M., A. Tarantola, M.C. Boiron, A. Izart, P. Boulvais, I. Techer (2012) Paleo-water circulation through an aquifer/aquitard system: a geochemical study of secondary minerals and fluid inclusions at the French prospective radioactive waste disposal site. *Geofluids*, Paris, 6-8 juin 2012
- Chicharo E., Boiron M.C., Lopez Garcia J.A., Villaceca C., 2012, Combined microthermometric and Raman spectroscopic techniques to characterize the N₂-CH₄-CO₂-H₂O mixtures in fluid inclusions of the quartz veins of the Logrosan granitic cupola (Caceres, Spain).
- Eglinger A., André-Mayer A-S., Vanderhaeghe O., Decrée S., Cuney M., Mercadier J., Lach P., Feybesse J.L., Milesi J.P. (2012). From unconformity to syn-metamorphic uranium type deposits in the Copperbelt: Contribution of uraninite geochemical signatures. 4th International Geologica Belgica Meeting “Moving plates and melting icecaps. Processes and forcing factors in geology”. Session 13a, September 14th 2012.
- Eglinger A., André-Mayer A.S., Vanderhaeghe O., Cuney M., Durand C., Feybesse J.L. Uranium mobilisation during the Panafrican metamorphism: implications on Cu-Co-(U) deposits, Domes region, NW Zambia. *Goldschmidt*, Montreal, juin 2012. Oral
- Eglinger A., Vanderhaeghe O., André-Mayer A.S. Mobilisation U-Th-REE durant le métamorphisme panafricain: implications sur

les gisements Cu-Co-(U), Dôme de Solwezi, Zambie. École thématique Ressources minérales: la vision du mineur, Paris. 1-3 février. Poster

Eglinger A., Vanderhaeghe O., André-Mayer A.S., Zeh A., Durand C., Paquette J.L.. Deciphering the processes of crustal growth reworking of the « dome » inliers within neoproterozoic Lufilian belt, NW Zambia, Goldschmidt, Montreal, juin 2012. Poster

Eglinger A.; André-Mayer A.-S., Vanderhaeghe O.; Mercadier J.; Decrée S.; Cuney M.; Feybesse J.-L.; Milési J.-P., (2012). Geochemical signatures of uraninite: From unconformity to syn-metamorphic uranium deposits in the Panafrican Lufilian Copperbelt. Réunion de la Société Géologique de France, « Journées Uranium », 26-27 novembre 2012 Université de Paris-Sud, Faculté des Sciences-Campus d'Orsay. p.6.

Groulier P.A., Ohnenstetter D., André-Mayer A.S., Solgadi F., Moukhsil A. and El Basbas A. Le système minéralisé en Nb-Ta-REE du gîte associé à l'intrusion alcaline de CREVIER (province du Grenville, Québec) : nouvelles données cartographiques, minéralogiques, pétrographiques et géochimiques. Québec Mines, 26-29 novembre, Québec. Poster

Huot H., Simonnot M.O., Marion P., Yvon J., De Donato P., Charbonnier P., Morel J.L. (2013) Availability of heavy metals in a former settling pond of iron industry, 12th International UFZ-Delatares Conference on Groundwater-Soil-Systemes and Water Resource Management, AquaConSoil, Barcelon, Spain - 16-19 April 2013 (communication orale)

Huot H., Simonnot M.O., Marion P., Yvon J., De Donato P., Morel J.L. (2012) Formation and early pedogenetic evolution of a Technosol developing on iron industry deposits, 4th International Congress EUROSOL, Poster session S01.01-P-6 Bari, Italy – 2-6 July 2012 (poster)

Jacquemet N., Guillaume D., Boiron M.C., Pokrovski G. S., Zwick A., Peiffert C., 2012, Does the trisulfur ion control the gold transport in hydrothermal fluids? A synthetic fluid inclusions study. Gordon Research

conference, Geochemistry of Mineral Deposits, July 15-20, 2012, Proctor Academy, Andover, NH, USA.

Lach, P., Cuney, M., Mercadier, J., Boiron, M.-C., Dubessy, J., 2012, Coupled isotopic U/Pb dating and La-icp-ms analyses for determining genetic conditions of the End Grid uranium deposit (Thelon Basin, Canada) GAC-MAC-St John's Canada, 27-29 Mai 2012.

Mercadier J., Cuney M., Lach, P., Boiron, M.-C. Bonhoure, J., Richard A., 2012, Origin of uranium deposits revealed by their rare earth element signature Goldschmidt conf. 24-29 juin, Montréal, Canada.

Mercadier, J., Richard, A., Cathelineau, M., Boiron, M.-C. and Cuney, M. (2012) From sources to deposits: recent advances on the uranium mineralizing brines in the Athabasca basin (Saskatchewan, Canada) GAC-MAC-St John's Canada, 27-29 Mai 2012

Richard A, Rozsypal C, Banks DA, Mercadier J, Cuney M, Boiron M-C & Cathelineau M (2011) Conditions for Uranium Transport in Unconformity-Related U Deposits Goldschmidt 2011Prague

Richard A. Cauzid J., Cathelineau M., Boiron M. C., Mercadier J., Cuney M., 2012, Synchrotron-XRF and Xanes investigation of fluid inclusions from unconformity-related Uranium deposits. Geofluids, Paris, 6-8 juin 2012

Richard, A., Kendrick, M.A., Cathelineau M. (2012) The origin of mineralising brines in unconformity-related U deposits: Insights from noble gases and halogens in fluid inclusions Goldschmidt conf. 24-29 juin, Montreal, Canada,

Toe, W. ; André-Mayer A.-S., Vanderhaeghe O., Feybesse J.-L., Paquette J.-L., Poujol M., Milési J.-P. 2012. Conférence Contexte géologique des gisements primaires d'U de la ceinture orogénique de Damara, Namibie : de la source migmatitique au gisement plutonique. Apports géochimiques à la compréhension de transferts d'éléments liés aux processus de fusion partielle. Congrès Delaunay, Montréal 9-12 Mai 2012. Programmes et résumés, p.45.

Communications scientifiques 2013

Ballouard, C., Poujol, M., Boulvais, P., Tartese, R., Gapais, D., Yamato, P., Cuney, M. (2013) Enregistrement tectonique, histoire magmatique et mobilité élémentaire dans le leucogranite hercynien de Guérande, Massif Armoricaïn. 25-26 Novembre 2013 : Réunion spécialisée de la Société Géologique de France, Orsay, France

Belissant R., Boiron M.-C., Luais B., Cathelineau M. (2013) Ge, related trace elements, and Ge isotopes in sphalerite from the Saint-Salvy deposit (France) by LA-ICPMS and MC-ICP-MS. Mineralogical Magazine, 77(5) 679, Goldschmidt Conference, Florence, Italy, August 25–30.

- Belissant R., Luais B., Boiron M.-C., Cathelineau M. (2013) – Ge isotopic tracing of sphalerite from the Noailhac – Saint-Salvy deposit (SW Massif Central, France): A MC-ICP-MS and LA-ICP-MS study. EnvironMetal Isotope Conference, August 18–23, Ascona, Switzerland, p.44.
- Bonnetti, C., Cuney, M., Malartre, F., Michels, R., Bourlange, S., Liu, X., Peng, Y. (2013) The Bayinwula Roll Front-Type Uranium Deposit, Erlian Basin, NE China. IAEA Technical Meeting “Metasomatite uranium occurrences and deposits” Vienne, AUTRICHE
- Bonnetti, C., Cuney, M., Michels, R., Truche, L., Malartre, F., Liu, X., Yang, J. (2013) The multiple roles of sulphate-reducing bacteria and Fe-Ti oxides in the genesis of the Bayinwula roll front-type uranium deposit, Erlian basin, NE China. 25-26 Novembre 2013 : Réunion spécialisée de la Société Géologique de France, Orsay, France
- Carruee, S., Moyen, J.F., Cuney, M. (2013) The oldest uraninite of the world from the Mpuluzi and Heerenveen granites/pegmatites (Barberton area, South Africa): a possible source for the Dominion Reef quartz pebble conglomerate uranium mineralization. IAEA Technical Meeting “Metasomatite uranium occurrences and deposits” Vienne, AUTRICHE
- Cathelineau M., Mercadier J., Boiron M. C., Richard A., Cuney M., 2013, Métasomatisme magnésien et formations des minéralisations uranifères à la discordance socle couverture. Journée Uranium, Réunion de la Société géologique de France, Orsay, Novembre 2013.
- Cathelineau M., Talbot J.Y., Boiron M.C., Gaillard N., Cuney, M., Vanhanen E., Lees T., Hudson M., Cook N., Deloule E., Brouand M., Caillat C., (2013) The atypical Au (U) – calc- silicate hosted mineralization of Rompas (North Finland): fluid – rock interactions and ore genesis. SGA Meeting, Upsala, Aout 2013.
- Cuney, M. (2013) The diversity of sodium metasomatic processes and their relations to uranium deposits. Key Note Lecture 17-19 Juin 2013 : IAEA Technical Meeting “Metasomatite uranium occurrences and deposits” Vienne, AUTRICHE
- Cuney, M. (2013) Uranium deposits associated to metasomatic processes. IAEA Technical Meeting “Metasomatite uranium occurrences and deposits” Vienne, AUTRICHE Chairman of the meeting
- Cuney, M. (2013) A genetic classification of uranium deposits, Key note lecture 19-22 Février 2013 : International workshop on Volcanic related uranium deposits and Uranium deposit classifications, IAEA, Vienne, Autriche
- Cuney, (2013) Fertility of magma types and diversity of uranium deposits associated to volcanic rocks Invited lecture 19-22 Février 2013 : International workshop on Volcanic related uranium deposits and Uranium deposit classifications, IAEA, Vienne, Autriche
- Diondoh M., Vanderhaeghe O., André-Mayer A.S., Isseini M. Ohnenstetter M. et Cuney M. (2013) - Minéralisations uranifères associées au métasomatisme sodique des granites pan-africains de type A, massif du Mayo-Kabbi, sud-ouest du Tchad. Réunion de la Soc. geol. de Fr.: Les journées uranium, 25-26 nov. 2013, Orsay p. 20.
- Dyja V., Tarantola A., Hibsich C., Cathelineau M., Boiron M. C., (2013) Evolution of fluid sources during the Neogene exhumation of the Almagrera MCC (Betic Cordillera, Spain). XXII ECROFI meeting, Antalya, Turquie, 4-9 Juin 2013.
- Eglinger A.; Tarantola A.; André-Mayer A.-S.; Vanderhaeghe O.; Ferraina C.; Cuney M.; Richards M.; Brouand M. (2013). Genesis of synmetamorphic U mineralizations in the high-grade Neoproterozoic rocks of the Lufilian belt, Domes region, Zambia. Réunion de la Société Géologique de France “Journées Uranium”. Paris Orsay, 25-Novembre. Résumés. p. 12.
- Eglinger A.; Tarantola A.; Vanderhaeghe O.; André-Mayer A.-S., Ferraina C., Cuney M.; Richards M., Brouand M. (2013). The synmetamorphic Uranium deposits in high-grade Neoproterozoic rocks in the Lufilian belt, Domes region, Zambia. 12th SGA (Society for Applied Geology to Mineral Deposits) Biennial Meeting, Upsalla 12-15th August 2013.
- Ferraina C., Eglinger A., Tarantola A., Dubessy J., André-Mayer A.-S., and Vanderhaeghe O., (2013). Fluids Related To the Pan-African Synmetamorphic Uranium Mineralizations In The Domes Region, Lufilian Belt (Zambia). 22nd meeting of the European Current Research on Fluid Inclusions, ECROFI, Antalya, June 7th to 9th, 2013.
- Leisen M., Boiron M. C., Essarraj S., Dubessy J., (2013) Origin of brines associated with the Bou Azzer silver deposit, Anti-Atlas, Morocco: A LA-ICPMS study of individual fluid inclusions. Goldschmidt Conference, Florence, Aout 2013, p 1582.
- Liu P-P, Zhou M-F, Luais B, Cividini D & Rollion-Bard C (2013) Iron Isotope Systematics of the Baima Magmatic Fe-Ti(V) Oxide Deposit, SW China. Mineralogical Magazine, 77(5) 1626, Goldschmidt Conference, Florence, 25-30 août 2013
- Mbagedje, D., Ohnenstetter, M., André-Mayer A.S., Vanderhaeghe, O., Cuney, M. (2013) Minéralisations en phosphore et uranium des albitites du Mayo-Kebbi, Tchad. 25-26

- Novembre 2013 : Réunion spécialisée de la Société Géologique de France, Orsay, France
- Mbaguedje, D., Vanderhaeghe, O., Andre-Mayer A.S., Isseini, M., Ohnenstetter, M., Cuney, M. (2013) Minéralisations uranifères associées au métasomatisme sodique des granites Pan-Africain de type A, massif du Mayo-kabbi, Sud-Ouest du Tchad 25-26 Novembre 2013 : Réunion spécialisée de la Société Géologique de France, Orsay, France
- Mercadier J., Lach P., Boiron M. C., Richard A., Leisen M. Dubessy J., Cathelineau M., Cuney M., (2013) Potentialités du LA-ICPMS pour la détermination des éléments traces des minéraux et des inclusions fluides : apports pour la métallogénie de l'uranium. Journée Uranium, Réunion de la Société géologique de France, Orsay, Novembre 2013.
- Mouelea, I.M., Dudoignon, P., El Albani, A., Martin, H., Paquette, J.L., Cuney, M., Gauthier-Lafaye, F. (2013) Archean granitoid-Paleoproterozoic unconformity: superimposition of alterations in Archean granitoid (Gabon). 09-14 Juin 2013: WRI 14 - Water Rock Interactions - Avignon, FRANCE
- Negue Nomo E., Tchameni R., Vanderhaeghe O., Barbey P. (2013). Accrétion tectonique et magmatique sur la marge nord du craton du Congo : mise en place d'un pluton panafricain syntectonique dans la zone de cisaillement de Tcholliré (Centre Nord Cameroun). Réunion de la Société Géologique de France "Journées Uranium". Paris Orsay, 25-Novembre. Résumés. p. 39.
- Pascal M., Ansdell K., Annesley I.R., Boiron M.C., Kotzer T., Jiricka D., Cuney M., (2013) Microthermometric and Raman analysis of fluids that interacted with variably graphitic pelitic schist in the Dufferin Lake zone, south-central Athabasca Basin: Implications for graphite loss and uranium deposition. Goldschmidt Conference, Florence, Aout 2013, p 1930.
- Reisberg L., Ohnenstetter M., Zimmermann C A. (2013) - Chromitites from the Andriamena greenstone belt, Madagascar: Hints of a Mid-Archean ophiolite? Goldschmidt 2013, Florence, Italy, Geochimica et Cosmochimica Acta, Conference Abstract p 2047. DOI:10.1180/minmag.2013.077.5.18
- Richard A., Cathelineau M., Boiron M.C., Cuney M., Mercadier J., Rozsypal C., Cauzid J., Banks D.A., Boulvais P., Kendrick M.A., Pettke T., (2013) Unconformity –related U deposits : recent advance from fluid inclusions and their host minerals. SGA Meeting, Upsala, Aout 2013.
- Royer, J.J., Cuney, M. (2013) Etude statistique des relations tonnage/teneur des gisements uranifères dans le monde. 25-26 Novembre 2013 : Réunion spécialisée de la Société Géologique de France, Orsay, France
- Villaras, A., Pichavant, M., Moyen, J.F, Cuney, M (2013) Contrasting peraluminous granites in a collapsing Orogen: Examples from the French Massif Central 07-12 Avril 2013 : EUG 2013 Conference, Vienne, Autriche
- Wenrich, K., Lach, Ph., Cuney, M. (2013) Rare-Earth Elements in Uraninite – Breccia Pipe Uranium District, Northern Arizona, USA. 25-30 Septembre 2013 : 9th American Institute of Professional Geologist Conference, Rapid City, South Dakota, USA

Conférence invitée

- Boiron M.C., 2013, Les paléofluides marqueurs des transferts de matière dans la croûte. Rencontres scientifiques de pétrologie endogène, Nancy, 22-23 janvier 2013

Traitement des Minerais – PRA-2

Publications

- Bani, A., Echevarria, G., Montargès-Pelletier, E., Gjoka, F., Sulçe, S., Morel, J.L. 2014. Pedogenesis and nickel biogeochemistry in a typical Albanian ultramafic toposequence. *Environmental Monitoring and Assessment*, (major revision).
- Bani, A., Echevarria, G., Sulçe, S., Morel, J.L. 2014. Improving the agronomy of *Alyssum murale* for extensive phytomining: A five-year field study. *International Journal of Phytoremediation*. Sous presse.
- Bani, A., Imeri, A., Echevarria, G., Pavlova, D., Reeves, R.D., Morel, J.L., Sulçe, S. 2013. Nickel Hyperaccumulation in the Serpentine Flora of Albania. *Fresenius Environmental Bulletin*. 22 (6), 1792-1801.
- Chardot-Jacques, V., Calvaruso, C., Simon, B., Turpault, M.-P., Echevarria, G., Morel, J.L. 2013. Chrysotile Dissolution in the Rhizosphere of the Nickel Hyperaccumulator *Leptoplax emarginata*. *Environmental Science & Technology* 47 (6), 2612–2620.
- Lucisine, P., Echevarria, G., Sterckeman, T., Vallance, J., Rey, P., Benizri, E. 2013. Effect of hyperaccumulating plant cover composition and rhizosphere-associated bacteria on the efficiency of nickel extraction from soil. *Applied Soil Ecology* (under review)
- Shahid, M., Austruy, A., Echevarria, G., Arshad, M., Sanaullah, M., Aslam, M., Nadeem, M., Nasim, W., Dumat, C. 2014. EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metals: A review. *Soil and Sediment Contamination* 23 (4), 389-416.
- Zhang, X., Houzelot, V., Bani, A., Morel, J.L., Echevarria, G., Simonnot, M.O. 2014. Selection and combustion of Ni-hyperaccumulators for the phytomining process. *International Journal of Phytoremediation*. Sous presse. DOI:10.1080/15226514.2013.810585

Communications scientifiques

- Echevarria, G., Bani, A., Simonnot, M.O., Morel, J.L. 2013. Designing Cropping Systems for Ni Phytomining By Hyperaccumulators in Ultramafic Soils of the Balkans. *Aquaconsoil*, Barcelone, 16-19 avril 2013.
- Zhang, X., Houzelot, V., Barbaroux, R., Plasari, E., Mercier, G., Blais, J.F., Bani, A., Echevarria, G., Morel, J.L., Simonnot, M.O. 2013. New hydrometallurgical process for soil remediation and nickel recovery from hyperaccumulating plants, *Suitma* 7, Torun (Poland), 16-20 September 2013.
- Zhang, X., Simonnot, M.O., Houzelot, V., Barbaroux, R., Plasari, E., Mercier, G., Blais, J.F., Bani, A., Echevarria, G., Morel, J.L. 2013. Nickel recycling from the biomass of the hyperaccumulating plant *Alyssum murale*. *Aquaconsoil*, Barcelone, 16-19 avril 2013.

Impact environnemental – PRA3

Master 2

Carole BERTRAND. Développement et application des tests de génotoxicité sur *Dreissena polymorpha* »

Elisabeth PETIT. Impacts cellulaires d'un agent de contraste au gadolinium sur des cellules humaines en culture

Manel KHEDRI, gradient de pollution sur l'Orne"

Master 1

Allison SCHEFFER. Conséquences d'une exposition chronique aux nanoparticules : effets populationnels

Maxime URIARTE. Conséquences d'une exposition chronique aux nanoparticules : effets subindividuels

DENEGRE Sophie et Louise CHATAIN 2013 (3ème année-ENSG). Analyse de la spéciation dynamique des métaux en présence de nanoparticules de type cœur/couronne

Thèses en cours

ANDREI. Jennifer 2012-Effets des nanoparticules manufacturées sur les invertébrés d'eau douce et leurs fonctions au sein des écosystèmes. Approche intégrée chez le gammare. Direction de thèse Pr. François GUÉROLD et Dr. Sandrine PAIN-DEVIN. Co financé **Labex R21**. Région Lorraine

PERRAT Emilie 2013- Impacts environnementaux des agents de contraste au gadolinium : situation locale, approche cellulaire et *in vivo*. Dir. C Cossu Leguille et Marc PARANT. Financement Région Lorraine et Ressource 21.

AHARCHAOU. Imad 2013-Mécanismes de toxicité des éléments trivalents : importance des espèces solubles et insolubles Dir. Davide A.L. Vignati et Eric Battaglia. Financement bourse ministérielle.

BERTRAND Carole 2013 - Nanomatériaux à travers un gradient de salinité: exposition et effets ecotoxicologiques au cours de leur cycle de vie (production, utilisation, fin de vie). Directrice L Giamberini, C Mouneyrac (Université Catholique de l'Ouest). Codirecteurs S. Devin, L Poirier (UCO).Financement ANR nanosalt

KANBAR Hussein 2012-2015 Devenir des métaux dans les enregistrements sédimentaires, cas des barrages de Moyeuve et Homécourt sur l'Orne. Dir Frederic Villieras, Antoine El Samrani université du Liban, Codirectrice E. Montarges-Pelletier codir, codir EMP

LE MEUR, Mathieu 2012-2015 Nature et réactivité des matières en suspension de la Moselle, influence de la minéralogie et des propriétés de surfaces sur le mode de fixation des métaux".directeur Frédéric Villieras, Codirectrice E. Montarges-Pelletier

GARAUD Mael. 2011- Effets des nanoparticules manufacturées (CeO₂, TiO₂ et Ag₀, nanotubes de carbone) sur la biologie du bivalve d'eau douce *Dreissena polymorpha*. Direction de thèse. Laure Giambérini & Vincent Felten. Financement ANR Mesonnet

MARTIN Jennifer 2011-2014. Dynamique de spéciation de cations métalliques aux interfaces molles biotiques (bactéries) et abiotiques (hydrogels). Directeur J. Duval, Codirectrice E Rotureau. Financement bourse ministérielle.

JOMINI Stéphane. 2010- Ecotoxicité des nanoparticules (TiO₂, ZnO, CeO₂) et des résidus de dégradation de nanomatériaux sur les communautés bactériennes : Impact sur la diversité taxonomique et fonctionnelle. Direction de thèse. Pascale Bauda. Christophe Pagnout

BERTHELOT Charlotte, Phytoremédiation de sols pollués - Étude des mécanismes de tolérance aux métaux lourds chez les plantes et leurs symbiotes associés. UL, BVF, LIEC, direction Leyval C.

Publications 2012

- Ahmad, MA; Prelot, B; Razafitianamaharavo, A, Douillard, JM; Zajac, J; Dufour, F; Durupthy, O; Chaneac, C; Villieras, F (2012) Influence of Morphology and Crystallinity on Surface Reactivity of Nanosized Anatase TiO₂ Studied by Adsorption Techniques. 1. The Use of Gaseous Molecular Probes. *Journal Of Physical Chemistry C*, 116, 24596- 24606. DOI : 10.1021/jp307707h
- Barbaroux, R; Plasari, E; Mercier, G; Simonnot, MO; Morel, JL; Blais, JF (2012) A new process for nickel ammonium disulfate production from ash of the hyperaccumulating plant *Alyssum murale*. *Science Of The Total Environment*, 423, 111- 119. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2012.01.063
- Bartoli, F; Coinchelin, D; Robin, C; Echevarria, G (2012) Impact of active transport and transpiration on nickel and cadmium accumulation in the leaves of the Ni-hyperaccumulator *Leptoplax emarginata*: a biophysical approach. *Plant And Soil*, 350, 99-115. DOI : 10.1007/s11104-011-0885-9
- Bigorgne, E; Foucaud, L; Caillet, C; Giamberini, L; Nahmani, J; Thomas, F; Rodius, F (2012) Cellular and molecular responses of *E. fetida* coelomocytes exposed to TiO₂ nanoparticles. *Journal Of Nanoparticle Research*, 14, - . DOI : 10.1007/s11051-012-0959-5
- Bongoua-Devisme, AJ; Mustin, C; Berthelin, J (2012) Responses of Iron-Reducing Bacteria to Salinity and Organic Matter Amendment in Paddy Soils of Thailand. *Pedosphere*, 22, 375-393.
- Caland, F; Miron, S; Brie, D; Mustin, C (2012) a blind sparse approach for estimating constraint matrices in paralind data models. 2012 proceedings of the 20th european Signal Processing Conference (Eusipco), 839- 843.
- Carbone, C; Marescotti, P; Lucchetti, G; Martinelli, A; Basso, R; Cauzid, J (2012) Migration of selected elements of environmental concern from unaltered pyrite-rich mineralizations to Fe-rich alteration crusts. *JOURNAL OF GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 114, 109-117. DOI : 10.1016/j.gexplo.2012.01.003
- Coinchelin, D; Bartoli, F; Robin, C; Echevarria, G (2012) Ecophysiology of nickel phytoaccumulation: a simplified biophysical approach. *Journal Of Experimental Botany*, 63, 5815- 5827. DOI : 10.1093/jxb/ers230
- Cornut, J; Clivot, H; Chauvet, E; Elger, A; Pagnout, C; Guerold, F (2012) Effect of acidification on leaf litter decomposition in benthic and hyporheic zones of woodland streams. *Water Research*, 46, 6430- 6444. DOI : 10.1016/j.watres.2012.09.023
- Couleau, N; Techer, D; Pagnout, C; Jomini, S; Foucaud, L; Laval-Gilly, P; Falla, J; Bennisroune, A (2012) Hemocyte responses of *Dreissena polymorpha* following a short-term in vivo exposure to titanium dioxide nanoparticles: Preliminary investigations. *Science Of The Total Environment*, 438, 490- 497. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2012.08.095
- Duval, JFL; van Leeuwen, HP (2012) Rates of Ionic Reactions With Charged Nanoparticles In Aqueous Media. *Journal Of Physical Chemistry A*, 116, 6443- 6451. DOI : 10.1021/jp209488v
- Foltete, AS; Masfaraud, JF; Ferard, JF; Cotelle, S (2012) Is there a relationship between early genotoxicity and life-history traits in *Vicia faba* exposed to cadmium-spiked soils?. *Mutation Research-Genetic Toxicology And Environmental Mutagenesis*, 747, 159- 163. DOI : 10.1016/j.mrgentox.2010.12.011
- Gismondi, E; Cossu-Leguille, C; Beisel, JN (2012) Acanthocephalan parasites: help or burden in gammarid amphipods exposed to cadmium?. *ECOTOXICOLOGY*, 21, 1188- 1193. DOI : 10.1007/s10646-012-0873-8
- Gismondi, E; Rigaud, T; Beisel, JN; Cossu-Leguille, C (2012) Effect of Multiple Parasitic Infections on the Tolerance to Pollutant Contamination. *Plos One*, 7, - . DOI : 10.1371/journal.pone.0041950
- Gismondi, E; Beisel, JN; Cossu-Leguille, C (2012) *Polymorphus minutus* Affects Antitoxic Responses of *Gammarus roeseli* Exposed to Cadmium. *Plos One*, 7, - . DOI : 10.1371/journal.pone.0041475
- Gismondi, E; Rigaud, T; Beisel, JN; Cossu-Leguille, C (2012) Microsporidia parasites disrupt the responses to cadmium exposure in a gammarid. *Environmental Pollution*, 160, 17- 23. DOI : 10.1016/j.envpol.2011.09.021
- Hafeez, F; Spor, A; Breuil, MC; Schwartz, C; Martin-Laurent, F; Philippot, L (2012) Distribution of bacteria and nitrogen-cycling microbial communities along constructed Technosol depth-profiles. *Journal Of Hazardous Materials*, 231, 88- 97. DOI : 10.1016/j.jhazmat.2012.06.041
- Immel, F; Renaut, J; Masfaraud, JF (2012) Physiological response and differential leaf proteome pattern in the European invasive Asteraceae *Solidago canadensis* colonizing a former cokery soil. *Journal Of Proteomics*, 75, 1129- 1143. DOI : 10.1016/j.jprot.2011.10.026

- Jomini, S; Labille, J; Bauda, P; Pagnout, C (2012) Modifications of the bacterial reverse mutation test reveals mutagenicity of TiO₂ nanoparticles and byproducts from a sunscreen TiO₂-based nanocomposite. *Toxicology Letters*, 215, 54-61. DOI : 10.1016/j.toxlet.2012.09.012
- Krapf, MEM; Lartiges, BS; Merlin, C; Francius, G; Ghanbaja, J; Duval, JFL (2012) Polyethyleneimine-mediated flocculation of *Shewanella oneidensis* MR-1: Impacts of cell surface appendage and polymer concentration. *Water Research*, 46, 1838- 1846. DOI : 10.1016/j.watres.2011.12.061
- Manusadzianas, L; Caillet, C; Fachetti, L; Gylte, B; Grigutyte, R; Jurkoniene, S; Karitonas, R; Sadauskas, K; Thomas, F; Vitkus, R; Ferard, JF (2012) Toxicity of copper oxide nanoparticle suspensions to aquatic biota. *Environmental Toxicology And Chemistry*, 31, 108- 114. DOI : 10.1002/etc.715
- Merlin, J; Duval, JFL (2012) Metal speciation in a complexing soft film layer: a theoretical dielectric relaxation study of coupled chemodynamic and electrodynamic interfacial processes. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 14, 4491- 4504. DOI : 10.1039/c2cp23611g
- Minguez, L; Buronfosse, T; Giamberini, L (2012) Different Host Exploitation Strategies in Two Zebra Mussel-Trematode Systems: Adjustments of Host Life History Traits. *PLOS ONE*, 7, - . DOI : 10.1371/journal.pone.0034029
- Minguez, L; Boiche, A; Sroda, S; Mastitsky, S; Brule, N; Bouquerel, J; Giamberini, L (2012) Cross-effects of nickel contamination and parasitism on zebra mussel physiology. *Ecotoxicology*, 21, 538- 547. DOI : 10.1007/s10646-011-0814-y
- Minguez, L; Buronfosse, T; Beisel, JN; Giamberini, L (2012) Parasitism can be a confounding factor in assessing the response of zebra mussels to water contamination. *Environmental Pollution*, 162, 234 - 240. DOI : 10.1016 / j.envpol.2011.11.005
- Pagnout, C; Jomini, S; Dadhwal, M; Caillet, C; Thomas, F; Bauda, P (2012) Role of electrostatic interactions in the toxicity of titanium dioxide nanoparticles toward *Escherichia coli*. *Colloids And Surfaces B-Biointerfaces*, 92, 315- 321. DOI : 10.1016/j.colsurfb.2011.12.012
- Palais, F; Dedourge-Geffard, O; Beaudon, A; Pain-Devin, S; Trapp, J; Geffard, O; Noury, P; Gourlay-France, C; Uher, E; Mouneyrac, C; Biagianti-Risbourg, S; Geffard, A (2012) One-year monitoring of core biomarker and digestive enzyme responses in transplanted zebra mussels (*Dreissena polymorpha*). *Ecotoxicology*, 21, 888- 905. DOI : 10.1007/s10646-012-0851-1
- Qiu, RL; Zhang, DD; Diao, ZH; Huang, XF; He, C; Morel, JL; Xiong, Y (2012) Visible light induced photocatalytic reduction of Cr(VI) over polymer-sensitized TiO₂ and its synergism with phenol oxidation. *Water Research*, 46, 2299-2306. DOI : 10.1016/j.watres.2012.01.046
- Raous, S., Echevarria, G., Sterckeman, T., Hanna, K., Thomas, F., Martins, E.S., Becquer, T. 2013. Potentially toxic metals in ultramafic mining materials: identification of the main bearing and reactive phases. *Geoderma*. 192:111-119.
- Rizvi, SH; Gauquelin, T; Gers, C; Guerold, F; Pagnout, C; Baldy, V (2012) Calcium-magnesium liming of acidified forested catchments: Effects on humus morphology and functioning. *Applied Soil Ecology*, 62, 81- 87. DOI : 10.1016/j.apsoil.2012.07.014
- Sahli, L; Afri-Mehennaoui, FZ; El Okki, ME; Ferard, JF; Mehennaoui, S (2012) Assessment of sediment quality and pore water ecotoxicity in Kebir Rhumel basin (NE-Algeria): a combined approach. *Water Science And Technology*, 65, 393- 401. DOI : 10.2166/wst.2012.802
- Tang, YT; Cloquet, C; Sterckeman, T; Echevarria, G; Carignan, J; Qiu, RL; Morel, JL (2012) Fractionation of Stable Zinc Isotopes in the Field-Grown Zinc Hyperaccumulator *Noccaea caerulea* and the Zinc-Tolerant Plant *Silene vulgaris*. *Environmental Science & Technology*, 46, 9972- 9979. DOI : 10.1021/es3015056
- Tang, YT; Deng, THB; Wu, QH; Wang, SZ; Qiu, RL; Wei, ZB; Guo, XF; Wu, QT; Lei, M; Chen, TB; Echevarria, G; Sterckeman, T; Simonnot, MO; Morel, JL (2012) Designing Cropping Systems for Metal-Contaminated Sites: A Review. *Pedosphere*, 22, 470- 488. DOI :
- Thion, C; Cebron, A; Beguiristain, T; Leyval, C (2012) Long-term in situ dynamics of the fungal communities in a multi-contaminated soil are

mainly driven by plants. *Fems Microbiology Ecology*, 82, 169- 181. DOI : 10.1111/j.1574-6941.2012.01414.x

Town, RM; Duval, JFL; Buffle, J; van Leeuwen, HP (2012) Chemodynamics of Metal Complexation by Natural Soft Colloids: Cu(II) Binding by Humic Acid. *Journal Of Physical Chemistry A*, 116, 6489- 6496. DOI : 10.1021/jp212226j

Van Heghe, L; Engstrom, E; Rodushkin, I; Cloquet, C; Vanhaecke, F (2012) Isotopic analysis of the metabolically relevant transition metals Cu, Fe and Zn in human blood from vegetarians and omnivores using multi-collector ICP-mass spectrometry. *Journal Of Analytical Atomic Spectrometry*, 27, 1327- 1334. DOI : 10.1039/c2ja30070b

Vellinger, C; Parant, M; Rousselle, P; Usseglio-Polatera, P (2012) Antagonistic toxicity of

arsenate and cadmium in a freshwater amphipod (*Gammarus pulex*). *Ecotoxicology*, 21, 1817- 1827. DOI : 10.1007/s10646-012-0916-1

Vellinger, C; Felten, V; Sornom, P; Rousselle, P; Beisel, JN; Usseglio-Polatera, P (2012) Behavioural and Physiological Responses of *Gammarus pulex* Exposed to Cadmium and Arsenate at Three Temperatures: Individual and Combined Effects. *Plos One*, 7, - . DOI : 10.1371/journal.pone.0039153

Vellinger, C; Parant, M; Rousselle, P; Immel, F; Wagner, P; Usseglio-Polatera, P (2012) Comparison of arsenate and cadmium toxicity in a freshwater amphipod (*Gammarus pulex*). *Environmental Pollution*, 160, 66- 73. DOI : 10.1016/j.envpol.2011.09.002

Publications 2013

Abouddrar, W; Schwartz, C; Morel, JL; Boularbah, A (2013) Effect of nickel-resistant rhizosphere bacteria on the uptake of nickel by the hyperaccumulator *Noccaea caerulea* under controlled conditions. *Journal Of Soils And Sediments*, 13, 501- 507. DOI : 10.1007/s11368-012-0614-x

Ahmad, MA; Prelot, B; Dufour, F; Durupthy, O; Razafitianamaharavo, A; Douillard, JM; Chaneac, C; Villieras, F; Zajac, J (2013) Influence of Morphology and Crystallinity on Surface Reactivity of Nanosized Anatase TiO₂ Studied by Adsorption Techniques. 2. Solid-Liquid Interface. *Journal Of Physical Chemistry C*, 117, 4459- 4469. DOI : 10.1021/jp3077084

Bani, A; Imeri, A; Echevarria, G; Pavlova, D; Reeves, RD; Morel, JL; Sulce, S (2013) Nickel Hyperaccumulation In The Serpentine Flora Of Albania. *Fresenius Environmental Bulletin*, 22, 1792- 1801. DOI :

Bongoua-Devisme, AJ; Cebon, A; Kassin, KE; Yoro, GR; Mustin, C; Berthelin, J (2013) Microbial Communities Involved in Fe Reduction and Mobility During Soil Organic Matter (SOM) Mineralization in Two Contrasted Paddy Soils. *Geomicrobiology Journal*, 30, 347- 361. DOI : 10.1080/01490451.2012.688928

Bourgeault, A; Ciffroy, P; Garnier, C; Cossu-Leguille, C; Masfarau, JF; Charlatchka, R; Garnier, JM (2013) Speciation and bioavailability of dissolved copper in different freshwaters: Comparison of modelling, biological and chemical responses in aquatic mosses and gammarids. *Science Of The Total Environment*, 452, 68- 77. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2013.01.097

Cébron A., Arsene-Ploetze F., Bauda P., Bertin P.-N., Billard P., Carapito C., Devin S., Goulhen-Chollet F., Poirel J., Leyval C, 2013. Rapid impact of phenanthrene and arsenic on bacterial community structure and activities in polluted sand batches. *Microbial Ecology*. Accepted

Chardot-Jacques, V; Calvaruso, C; Simon, B; Turpault, MP; Echevarria, G; Morel, JL (2013) Chrysotile Dissolution in the Rhizosphere of the Nickel Hyperaccumulator *Leptoplax emarginata*. *Environmental Science & Technology*, 47, 2612- 2620. DOI : 10.1021/es301229m

Chatellier, X; Grybos, M; Abdelmoula, M; Kemner, KM; Leppard, GG; Mustin, C; West, MM; Paktunc, D (2013) Immobilization of P by oxidation of Fe(II) ions leading to nanoparticle formation and aggregation. *Applied Geochemistry*, 35, 325- 339. DOI : 10.1016/j.apgeochem.2013.04.019

Colas, F; Baudoin, JM; Danger, M; Usseglio-Polatera, P; Wagner, P; Devin, S (2013) Synergistic impacts of sediment contamination and dam presence on river functioning. *Freshwater Biology*, 58, 320- 336. DOI : 10.1111/fwb.12060

Devin S., Burgeot T., Giambérini L., Minguez L., Pain-Devin S, 2013. The Integrated Biomarker Response revisited: optimization to avoid misuse. *Environmental Science And Pollution Research*. sous presse

Dika, C; Ly-Chatain, MH; Francius, G; Duval, JFL; Gantzer, C (2013) Non-DLVO adhesion of F-specific RNA bacteriophages to abiotic surfaces: Importance of surface roughness, hydrophobic and electrostatic interactions. *Colloids And Surfaces A-Physicochemical And*

- Engineering Aspects, 435, 178- 187. DOI : 10.1016/j.colsurfa.2013.02.045
- Duval, JFL (2013) Dynamics of metal uptake by charged biointerphases: bioavailability and bulk depletion. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15, 7873- 7888. DOI : 10.1039/c3cp00002h
- El Khalil, H; Schwartz, C; El Hamiani, O; Kubiniok, J; Morel, JL; Boularbah, A (2013) Distribution of major elements and trace metals as indicators of technosolisation of urban and suburban soils. *Journal Of Soils And Sediments*, 13, 519- 530. DOI : 10.1007/s11368-012-0594-x
- Fatombi, JK; Lartiges, B; Aminou, T; Barres, O; Caillet, C (2013) A natural coagulant protein from copra (*Cocos nucifera*): Isolation, characterization, and potential for water purification. *Separation And Purification Technology*, 116, 35- 40. DOI : 10.1016/j.seppur.2013.05.015
- Garnier, J; Quantin, C; Guimaraes, EM; Vantelon, D; Montarges-Pelletier, E; Becquer, T (2013) Cr(VI) genesis and dynamics in Ferralsols developed from ultramafic rocks: The case of Niquelandia, Brazil. *Geoderma*, 193, 256- 264. DOI : 10.1016/j.geoderma.2012.08.031
- Gismondi, E; Cossu-Leguille, C; Beisel, JN (2013) Do male and female gammarids defend themselves differently during chemical stress?. *Aquatic Toxicology*, 140, 432- 438. DOI : 10.1016/j.aquatox.2013.07.006
- Huguier, P; Manier, N; Meline, C; Bauda, P; Pandard, P (2013) Improvement of the *Caenorhabditis elegans* growth and reproduction test to assess the ecotoxicity of soils and complex matrices. *Environmental Toxicology And Chemistry*, 32, 2100- 2108. DOI : 10.1002/etc.2282
- Huot, H; Simonnot, MO; Marion, P; Yvon, J; De Donato, P; Morel, JL (2013) Characteristics and potential pedogenetic processes of a Technosol developing on iron industry deposits. *Journal Of Soils And Sediments*, 13, 555- 568. DOI : 10.1007/s11368-012-0513-1
- Kassir, M; Roques-Carmes, T; Hamieh, T; Razafitianamaharavo, A; Barres, O; Toufaily, J; Villieras, F (2013) Surface modification of TiO₂ nanoparticles with AHAPS aminosilane: distinction between physisorption and chemisorption. *Adsorption-Journal Of The International Adsorption Society*, 19, 1197- 1209. DOI : 10.1007/s10450-013-9555-y
- electrohydrodynamics of soft colloidal polysaccharides. *Colloids And Surfaces A-Physicochemical And Engineering Aspects*, 435, 16- 21. DOI : 10.1016/j.colsurfa.2012.10.038
- Laporte, MA; Denaix, L; Pages, L; Sterckeman, T; Flenet, F; Dauguet, S; Nguyen, C (2013) Longitudinal variation in cadmium influx in intact first order lateral roots of sunflower (*Helianthus annuus*. L). *Plant And Soil*, 372, 581- 595. DOI : 10.1007/s11104-013-1756-3
- Lorin-Nebel, C; Felten, V; Blondeau-Bidet, E; Grousset, E; Amilhat, E; Simon, G; Biagianti, S; Charmantier, G (2013) Individual and combined effects of copper and parasitism on osmoregulation in the European eel *Anguilla anguilla*. *Aquatic Toxicology*, 130, 41- 50. DOI : 10.1016/j.aquatox.2012.11.018
- Lovy, L; Latt, D; Sterckeman, T (2013) Cadmium uptake and partitioning in the hyperaccumulator *Noccaea caerulescens* exposed to constant Cd concentrations throughout complete growth cycles. *Plant And Soil*, 362, 345- 354. DOI : 10.1007/s11104-012-1291-7
- Minguez, L; Devin, S; Molloy, DP; Guerold, F; Giamberini, L (2013) Occurrence of zebra mussel parasites: Modelling according to contamination in France and the USA. *Environmental Pollution*, 176, 261- 266. DOI : 10.1016/j.envpol.2013.01.031
- Pauget, B; Gimbert, F; Coeurdassier, M; Crini, N; Peres, G; Faure, O; Douay, F; Hitmi, A; Beguiristain, T; Alaphilippe, A; Guernion, M; Houot, S; Legras, M; Vian, JF; Hedde, M; Bispo, A; Grand, C; de Vaufleury, A (2013) Ranking field site management priorities according to their metal transfer to snails. *Ecological Indicators*, 29, 445- 454. DOI : 10.1016/j.ecolind.2013.01.012
- Perez, KFB; Charlatchka, R; Ferard, JF (2013) Assessment of the LuminoTox leachate phase assay as a complement to the LuminoTox solid phase assay: Effect of fine particles in natural sediments. *Chemosphere*, 90, 1310- 1315. DOI : 10.1016/j.chemosphere.2012.09.078
- Raous, S; Echevarria, G; Sterckeman, T; Hanna, K; Thomas, F; Martins, ES; Becquer, T (2013) Potentially toxic metals in ultramafic mining materials: Identification of the main bearing and reactive phases. *Geoderma*, 192, 111- 119. DOI : 10.1016/j.geoderma.2012.08.017
- Rotureau E, 2013. Analysis of metal speciation dynamics in clay minerals dispersion by Stripping Chronopotentiometry techniques *Colloids and Surfaces a: Physicochemical and Engineering Aspects*. in press
- Sagou, JPS; Rotureau, E; Thomas, F; Duval, JFL (2013) Impact of metallic ions on Tlili, S; Minguez, L; Giamberini, L; Geffard, A; Boussetta, H; Mouneyrac, C (2013) Assessment of the health status of *Donax trunculus* from the Gulf of Tunis using integrative biomarker indices. *Ecological Indicators*, 32, 285- 293. DOI : 10.1016/j.ecolind.2013.04.003

- Town, RM; Buffle, J; Duval, JFL; van Leeuwen, HP (2013) Chemodynamics of Soft Charged Nanoparticles in Aquatic Media: Fundamental Concepts. *Journal Of Physical Chemistry A*, 117, 7643- 7654. DOI : 10.1021/jp4044368
- Vellinger, C; Gismondi, E; Felten, V; Rousselle, P; Mehennaoui, K; Parant, M; Usseglio-Polatera, P (2013) Single and combined effects of cadmium and arsenate in *Gammarus pulex* (Crustacea, Amphipoda): Understanding the links between physiological and behavioural responses. *Aquatic Toxicology*, 140, 106- 116. DOI : 10.1016/j.aquatox.2013.05.010
- Vignati, DAL; Secieru, D; Bogatova, YI; Dominik, J; Cereghino, R; Berlinsky, NA; Oaie, G; Szobotka, S; Stanica, A (2013) Trace element contamination in the arms of the Danube Delta (Romania/Ukraine): Current state of knowledge and future needs. *Journal Of Environmental Management*, 125, 169- 178. DOI : 10.1016/j.jenvman.2013.04.007
- Zelano, I; Sivry, Y; Quantin, C; Gelabert, A; Tharaud, M; Jouvin, D; Montarges-Pelletier, E; Garnier, J; Pichon, R; Nowak, S; Miska, S; Abollino, O; Benedetti, MF (2013) Colloids and suspended particulate matters influence on Ni availability in surface waters of impacted ultramafic systems in Brazil. *Colloids And Surfaces A-Physicochemical And Engineering Aspects*, 435, 36- 47. DOI : 10.1016/j.colsurfa.2013.02.051

Communications internationales

- Andreï J, S Pain-Devin, V Felten, Joachim Ferro, M Garaud, B Marchal, K Mehennaoui, J Trapp & L Giambérini 2013 NANOPARTICLES & GAMMARIDS: from acute exposures to environmentally more relevant ones, toward a better detection of putative effects in natural environments. 8th international conference of the environmental effects of nanoparticles and nanomaterials (Aix en Provence, 2013) et Internationale conference Health and Environment 2013 – Frontiers in Environment Health Nanomaterials and Water – Friends or Foe? [P]
- Garaud M, A Bennasroune, C Chanéac, C Cossu-Leguille, N Couleau, S Devin, V Felten, B Marchal, K Mehennaoui, C Pagnout, S Pain-Devin, F Rodius, C Zanuttini & L Giambérini 2013. Multibiomarker assessment of TiO₂ nanoparticle effects on *Dreissena polymorpha* and *Gammarus roeseli* : influence of shape and crystal structure SETAC 2013, SETAC Europe 23rd annual meeting, 12-16 May 2013, Glasgow [P]
- Garaud M, A Bennasroune, C Cossu-Leguille, V Felten, C Pagnout, S Pain-Devin, F Rodius & L Giambérini 2013. Multibiomarker assessment of cerium and titanium dioxide nanoparticle (nCeO₂ and nTiO₂) sublethal effects on the freshwater invertebrates *Dreissena polymorpha* and *Gammarus roeseli* Journées Réseau LorLux, 2013, Luxembourg [O]
- Garaud M, A Bennasroune, C Cossu-Leguille, V Felten, C Pagnout, S Pain-Devin, F Rodius & L Giambérini 2013. Multibiomarker assessment of cerium and titanium dioxide nanoparticle sublethal effects on the freshwater mussel *Dreissena polymorpha* 8th ICEEN, 8th International Conference on the Environmental Effects of Nanoparticles and Nanomaterials, July 3rd-5th 2013, Aix en Provence. [O]
- Garaud M, J Andreï, C Bertrand, N Brulé, MA Dollard, V Felten, C Pagnout, S Pain-Devin, JF Poinsaint, F Rodius, P Rousselle, P Wagner & L Giambérini 2013. Aquatic mesocosm study of cerium dioxide nanoparticle effects on micro-organisms and invertebrates *Dreissena polymorpha* 8th ICEEN, 8th International Conference on the Environmental Effects of Nanoparticles and Nanomaterials, July 3rd-5th 2013, Aix en Provence. [P]
- Garaud M, J Trapp, C Cossu-Leguille, V Felten, S Pain-Devin, P Rousselle, P Wagner & L Giambérini 2012. Multibiomarker assessment of cerium dioxide nanoparticle (nCeO₂) sublethal effects on the freshwater invertebrates *Dreissena polymorpha* and *Gammarus roeseli* SETAC Berlin 2012, 6th SETAC World Congress Berlin, SETAC Europe 22nd annual meeting, 20-24 May 2012, Berlin [P]
- Garaud M, J Trapp, N Brulé, C Cossu-Leguille, A Daoud, V Felten, B Marchal, K Mehennaoui, C Pagnout, S Pain-Devin, JF Poinsaint, P Rousselle, P Wagner, Zanuttini C & L Giambérini 2012. Multibiomarker assessment of cerium and titanium dioxide nanoparticles (nCeO₂ and nTiO₂) sublethal effects on freshwater invertebrates. IAP 2012, 7th International Conference Interfaces Against Pollution, 11 - 14 June 2012, Palais des Congrès, 17-19, rue du grand Rabbin, Nancy. [O]
- Garaud M, N Brulé, C Cossu-Leguille, N Couleau, A Daoud, V Felten, B Marchal, K Mehennaoui, C Pagnout, S Pain-Devin, JF Poinsaint, P Rousselle, J Trapp, P Wagner, C Zanuttini & L Giambérini 2012. Évaluation des effets du

- dioxyde de cérium nanoparticulaire (nCeO₂) sur les invertébrés dulçaquicoles *Dreissena polymorpha* et *Gammarus roeseli* à l'aide d'une batterie de biomarqueurs. ECOBim 2012, 5 au 8 juin 2012, Université Reims Champagne-Ardenne, Reims. [P]
- Giambérini et al 2013. From microcosms to mesocosms : a multidisciplinary approach to assess the effects of nanoparticles on freshwater organisms. Health and Environment 2013 Frontiers in Environmental Health Nanomaterials and Water - Friends or Foe? October 16-18th Luxembourg (Conférence invitée)
- Jomini S., Bauda P., Pagnout C., Juillet 2013, Modified Ames test for evaluation of nanomaterials, 8th International Conference on the Environmental Effects of Nanoparticles and Nanomaterials, Aix en Provence, France. [P]
- Jomini S., Clivot H., Bauda P., Pagnout C., 2013, Effects of manufactured TiO₂ nanoparticles on planktonic and biofilm bacterial communities from the Moselle river (France), 8th International Conference on the Environmental Effects of Nanoparticles and Nanomaterials, Aix en Provence, France. [P]
- Martin J.E. Rotureau, J. P. Pinheiro, J. P. S. Farinha, J. F. L. Duval 2012. "Electrohydrodynamics of multiresponsive core-shell polymer particles" Interfaces Against Pollution, Nancy, 11-14 Juin 2012:
- Mesjasz-Przybylowicz J., Montarges-Pelletier E., Barnabas A., Echevarria G., Briois V., Sechogela T.P., Groeber S., Przybylowicz W. Issrs 2012 11th International School and Symposium on Synchrotron Radiation in Natural Science, 20-25 mai 2012, Krakow-Tyrric, Pologne, 1 affiche. Distribution and speciation of nickel in hyperaccumulating plants from South Africa.
- Montarges-Pelletier E., Duriez C., Ghanbaja J., Mouton L., Falkenberg G., Michot L.J. Interfaces Against Pollution, 11-14 juin 2012, Nancy, France, 1 affiche. Micro-scale investigations of the fate of heavy metals associated to iron-bearing colloids in a highly polluted stream.
- Montarges-Pelletier E., Mesjasz-Przybylowicz J., Echevarria G., Groeber S., Briois V., Barnabas A., Sechogela T.P., Przybylowicz W. Soleil Users Meeting 2012 – 18 & 19 janvier 2012, Palaiseau, France – 1 affiche. Ni localization and speciation within South African hyperaccumulating plants.
- Montarges-Pelletier E., Mesjasz-Przybylowicz J., Echevarria G., Groeber S., Briois V., Barnabas A., Sechogela T.P., Przybylowicz W. Interfaces Against Pollution, 11-14 juin 2012, Nancy, France, 1 conférence. Distribution and speciation of nickel in hyperaccumulating plants from South Africa
- Quantin C., Garnier J., Montarges-Pelletier E., Vantelon D., Guimares E.M., Becquer T. Interfaces Against Pollution, 11-14 juin 2012, Nancy, France, 1 conférence. Cr speciation and dynamics in tropical ultramafic soils: a synchrotron-based study.
- Quantin C., Jouvin D., Gelabert A., Montarges-Pelletier E., Sivry Y., Zelano I., Pichon R., Garnier J., Benedetti M.F. 22nd V.M. Goldschmidt conference – 24-29 juin 2012, Montréal, Canada – 1 conférence et 1 affiche. Combining microSXRF, EXAFS and isotopic signature to understand the Ni cycle in impacted ultramafic soils.
- Quantin C., Montarges-Pelletier E., Jouvin D., Lebreton C., Gelabert A., Pichon R. Garnier J. Interfaces Against Pollution, 11-14 juin 2012, Nancy, France, 1 affiche. Speciation and Fractionation of nickel in pyrometallurgical by-products: consequences for ultramafic environment.
- Rotureau E. 2012. Dynamic speciation analysis of metal binding by heterogeneous particles: case of clay minerals. Interfaces Against Pollution, Nancy 11-14 Juin 2012:
- Santiago-Morales J., Vignati D.A.L., Pagnout C., Ferard J.-F., Sohm B., Rosal R., 2013. Ecotoxicity of TiO₂ nanoparticles to *Pseudokirchneriella subcapitata*, 8th International Conference on the Environmental Effects of Nanoparticles and Nanomaterials, Aix en Provence 2013, France. [P]
- Santiago-Morales, J. D. Vignati, C. Pagnout, J. Ferard, R. Rosal, 2013. Insights on the toxicity of TiO₂ nanoparticles and nanomaterials on the green algae *Pseudokirchneriella subcapitata*. SETAC 2013 Glasgow, 15/05/2013 [P].
- Sohm B., Pagnout C., Immel F., Bauda P. 2013. Insights into the primary mode of action of titanium dioxide nanoparticles on *Escherichia coli*, 8th International Conference on the Environmental Effects of Nanoparticles and Nanomaterials, Aix en Provence 2013, France. [P]
- Vereecke J., Montarges-Pelletier E., Fraysse F., Bauer A., Rotureau E., Ghanbaja J., Salsi L., Wadwogel Y., Gley R., Razafitianamaharavo A. Interfaces Against Pollution, 11-14 juin 2012, Nancy, France, 1 affiche. Sorption of metals onto river suspended materials.
- Zelano I., Sivry Y., Jouvin D., Tharaud M., Quantin C., Gelabert A., Montarges-Pelletier E., Garnier J., Abollino O., Benedetti M.F. Interfaces Against Pollution, 11-14 juin 2012, Nancy, France, 1 conférence. Nickel (bio)availability in ultramafic systems from Goias, Brazil: an overlook of the compartments

Communications nationales

Garaud M, Amar Bennasroune, Carole Cossu-Leguille, Vincent Felten, Christophe Pagnout, Sandrine Pain-Devin, François Rodius & Laure Giambérini 2012 Effets sublétaux des nanoparticules manufacturées (nTiO₂, nCeO₂) sur la moule zébrée *Dreissena polymorpha* et l'amphipode *Gammarus roeseli*. Journées Zone Atelier Moselle, 21-22 mai 2013, Pont à Mousson [O]

Pain-Devin S, Maël Garaud, Nicolas Couleau, Jennifer Andreï, Amar Bennasroune, Carole Cossu-Leguille, Vincent Felten, Christophe Pagnout & Laure Giambérini 2013.

Nanoparticules : comment évaluer leurs effets potentiels sur les milieux aquatiques ? Synthèse des avancées du programme MESONNET. Congrès SEFA, Thionville, France. [O]

Parant M 2013. Rejets des agents de contraste au gadolinium : y-a-t-il un risque pour l'environnement ? Congrès SEFA, Thionville, France. [O]

Sohm B., Pagnout C., Immel F., Bauda P., 2013, Approches multiparamétriques pour la compréhension des mécanismes de toxicité des nanoparticules de TiO₂ chez *Escherichia coli*, Congrès SEFA, Thionville, France

Modéliser la géométrie, le transport et les processus physico-chimiques en 3D aux échelles régionales – PRA5

Masters 2012-2013

VAUTRIN Noémie (2013) – Modélisation de l'Impact des processus biogéochimiques en milieu poreux, 2013, F. Golfier

CHRETIEN Alexis (2013) - Modélisation de l'écoulement et transport en milieu fracturé sous HYTEC, 2013, F. Golfier, R. Giot.

LAFRANCE Noémie (2012) : Interprétation d'essais in situ de surcarottage avec prise en compte de l'anisotropie plastique, LAEGO, R. Giot.

MAILLOT, Jonathan (2012-2013) : Simplification de réseaux de failles 3D sous contraintes, Géoresources, J Pellerin et G. Caumon.

CHAUVIN, Benjamin (2012-2013) : Comparaison de Modèles structuraux pour le problème inverse, C. Julio et G Caumon.

BARTHELEMY, Clément (2012-2013) : Simulation de réseaux karstiques anastomosés ; P. Collon-Drouaillet.

DOUNDA R. (2012) – Discrimination de l'état d'oxydoréduction dans un roll front – utilisation des diagraphies. Areva, Mémoire de fin de cycle CESEV, Sept., 36p, CRPG, J-J Royer.

AMBLARD M. (2012) - 3D model of the rock units and faults in Vihanti mine and restoration of faulting with GOCAD, Rapport de Stage M1, GTK Southern Finland Office, Espoo, 51p, Géoresources, J-J Royer.

FRABOULET J.G. (2012) - 3D Modeling of Kupferschiefer, Poland. Master Natural Resources ENSG-INPL, Juin 2012, 37p, Géoresources, J-J Royer.

Thèses en cours

PAUL Bertrand (2013-), Modélisation de la propagation de fissures hydrauliques par la méthode des éléments finis étendue. Dir. GOLFIER, F., MASSIN, P.

CHEN Fengjuan (2013-), Modélisation microporomécanique de roches poreuses hétérogènes et applications aux roches oolithiques. Dir. GIRAUD, A., GRGIC, D.

BAHAR Tidjani Bahar (2012-), Impact de la présence d'une phase bactérienne sur les processus d'écoulement et de transport multiphasique en milieu poreux. Dir. GOLFIER, F., OLTEAN, C.

BENIOUG, Marbe (2011-), Etude expérimentale et numérique de la croissance microbienne en milieu poreux. Dir. BUES, M., GOLFIER, P., OLTEAN, C.

BONNEAU François (2011-), Prise en compte d'informations indirectes dans la simulation de réseaux de fractures. Dir. CAUMON, G., SAUSSE, J., RENARD, P.

BOTELLA Arnaud (2013-), Maillage hybride de domaines géologiques. Dir. CAUMON, G.

DELONCA Adeline (2011-), Incertitudes sur les paramètres des éboulements rocheux et leurs

impacts sur l'évaluation du risque. Dir. VERDEL, T., GUNZBERGER, Y.

NGUYEN Anhtuan (2012-), Modélisation des massifs rocheux fracturés appliquée aux mines à ciel ouvert et aux carrières : du relevé de fractures à la modélisation de la stabilité des ouvrages avec prise en compte des incertitudes. Dir. MERRIEN-SOUKATCHOFF, V., VINCHES, M.

PELLERIN Jeanne (2010-), Maillages conformes de domaines géologiques. Dir. LEVY, B., CAUMON, G.

REICHART Guillaume (2010-), Fonctionnement thermo-hydro-chimique des réservoirs de mines profondes ennoyées. Dir. BUES, M., COLLON-DROUAILLET, P., VAUTE, L.

RONGIER Guillaume (2013-), Simulation Multipoints de corps géologiques connectés. Dir. SAUSSE, J., COLLON-DROUAILLET, P.

RUIU Jérémy (2011-), Analyse géologique orientée objets d'images digitales de dépôts sédimentaires. Dir. CAUMON, G., VISEUR, S.

FAIVRE Maxime (2012-), Modélisation du comportement hydrogéomécanique d'un réseau de faille sous l'effet des variations de l'état de contrainte. Dir. GOLFIER, F., GIOT, R.

Thèses soutenues

LAURENT Gautier (2010-2013),
Compatibilité des structures en modélisation
3D. Dir. CAUMON, G.

MERLAND Romain (2009-2013),
Approche numérique dans la génération de
maillages conformes pour la simulation
d'écoulements dans les formations
géologiques. Dir. CAUMON, G.

Publications 2012

- Collon-Drouaillet, P; Henrion, V; Pellerin, J.
(2012) An algorithm for 3D simulation of
branchwork karst networks using Horton
parameters and A-star. Application to a
synthetic case. Geological Society of
London - Special Publications, 370 (1)
- Cherpeau, N; Caumon, G., Caers, JK; Levy, B
(2012) Method for stochastic inverse
modeling of fault geometry and
connectivity using flow data.
Mathematical Geosciences, 44:2, 147-
168.
- Harthong, B; Scholtes, L; Donze, F (2012)
Strength characterization of rock masses,
using a coupled DEM-DFN model.
GEOPHYSICAL JOURNAL
INTERNATIONAL 191(2): 467-480
DOI: 10.1111/j.1365-246X.2012.05642.x
- Giot, R; Giraud, A; Guillon, T; et al. (2012)
Three-dimensional poromechanical back
analysis of the pulse test accounting for
transverse isotropy. ACTA
GEOTECHNICA 7(3): 151-165 DOI:
10.1007/s11440-012-0158-7
- Giraud, A; Nguyen, NB; Grgic, D (2012)
Effective poroelastic coefficients of
isotropic oolitic rocks with micro and
meso porosities. INTERNATIONAL
JOURNAL OF ENGINEERING
SCIENCE 58: 57-77 DOI:
10.1016/j.ijengsci.2012.03.025

Publications 2013

- Bonneau, F; Henrion, V; Caumon, G; Renard, P ;
Sausse, J (2013) A methodology for pseudo-
genetic stochastic modeling of discrete fracture
network. Computers & Geosciences, 56 (12-22)
- Caumon, G; Gray, GG; Antoine, C; Titeux MO
(2013) 3D implicit stratigraphic model building
from remote sensing data on tetrahedral
meshes: theory and application to a regional
model of La Popa Basin, NE Mexico. IEEE
Transactions on Geoscience and Remote
Sensing, 51:3: 1613-1621
- Durand-Riard, P; Guzowski, CA; Caumon, G; Titeux,
MO (2013) Handling natural complexity in 3D

- Mainhagu, J; Golfier, F; Oltéan, C; Buès, M
(2012) Gravity-driven fingering in
fractures: experimental investigation and
dispersion analysis by moment method
for a point-source injection, Journal
Contaminant Hydrology, 132: 12-27.
doi:10.1016/j.jconhyd.2012.02.004
- Saadat, F; Sevostianov, I; Giraud, A (2012)
Approximate Representation of a
Compliance Contribution Tensor for a
Cylindrical Inhomogeneity Normal to the
Axis of Symmetry of a Transversely
Isotropic Material. INTERNATIONAL
JOURNAL OF FRACTURE 174(2):
237-244 DOI: 10.1007/s10704-012-
9688-0
- Scholtes, L; Donze, F (2012) Modelling
progressive failure in fractured rock
masses using a 3D discrete element
method. INTERNATIONAL JOURNAL
OF ROCK MECHANICS AND
MINING SCIENCES 52: 18-30 DOI:
10.1016/j.ijrmms.2012.02.009
- Sevostianov, I; Giraud, A (2012) On the
Compliance Contribution Tensor for a
Concave Superspherical Pore.
INTERNATIONAL JOURNAL OF
FRACTURE 177(2): 199-206 DOI:
10.1007/s10704-012-9754-7

geomechanical restoration, with application to
the recent evolution of the outer fold-and-thrust
belt, deepwater Niger Delta. AAPG Bulletin,
97:1, 87-102.

- Giraud, A; Sevostianov, I (2013) Micromechanical
modeling of the effective elastic properties of
oolitic limestone. INTERNATIONAL
JOURNAL OF ROCK MECHANICS AND
MINING SCIENCES 62: 23-27 DOI:
10.1016/j.ijrmms.2013.04.001
- Grgic, D; Giraud, A; Auvray, C (2013) Impact of
chemical weathering on micro/macro-
mechanical properties of oolitic iron ore.

- International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences. 64: 236-245 DOI: 10.1016/j.ijrmms.2013.09.005
- Laurent, G; Caumon, G; Bouziat, A; Jessell, M (2013) A parametric method to model 3D displacements around faults with volumetric vector fields. *Tectonophysics*, 590:83—93.
- Lomine, F; Scholtes, L; Sibille, L; et al. (2013) Modeling of fluid-solid interaction in granular media with coupled lattice Boltzmann/discrete element methods: application to piping erosion *International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics* 37(6), 577-596 DOI: 10.1002/nag.1109.
- Montel, JM; Giot, R (2013) Fracturing around radioactive minerals: elastic model and applications. *Physics And Chemistry Of Minerals*. 40(8): 635-645 DOI: 10.1007/s00269-013-0599-z
- Nizkaya, T; Angilella, JR; Buès, MA (2013) Inertial focusing of small particles in wavy channels: Asymptotic analysis at weak particle inertia. *Physica D Nonlinear Phenomena* 268:91-99.
- Oltéan, C; Golfier, F; Buès, MA (2013) Numerical and experimental investigation of buoyancy-driven dissolution in vertical fracture. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(5), 2038–2048, doi: 10.1002/jgrb.50188.
- Orgogozo, L; Golfier, F; Buès, MA; Quintard, M; Kone, T (2013) A dual-porosity theory for groundwater contaminant transport in biofilm-coated porous media. *Advances in Water Resources*, 62(Part B), 266-279.
- Pellerin, J; Levy, B; Caumon, G; Botella, A (2014) Automatic Surface Remeshing of 3D Structural Models at Specified Resolution: a Method Based on Voronoi Diagrams. *Computers & Geosciences* 62: 103-116.
- Rabeau, O; Royer, JJ; Jebrak, M; Cheilletz, A (2013) Log-uniform distribution of gold deposits along major Archean fault zones. *Mineralium Deposita* 48(7): 817-824.
- Scholtes, L; Donze, FV (2013) A DEM model for soft and hard rocks: Role of grain interlocking on strength. *Journal Of The Mechanics And Physics Of Solids* 61(2): 352-369 DOI: 10.1016/j.jmps.2012.10.005
- Sevostianov, I; Giraud, A (2013) Generalization of Maxwell homogenization scheme for elastic material containing inhomogeneities of diverse shape. *International Journal Of Engineering Science*, 64, 23-36 DOI: 10.1016/j.ijengsci.2012.12.004

Capteurs Biogéochimiques – PRA-6

Thèses soutenues en 2013 et en cours

Fabrice Caland (17/09/2013) - Décomposition tensorielle de signaux luminescents émis par des biosenseurs bactériens pour l'identification de Systèmes Métaux-Bactéries- Thèse de l'Université de Lorraine - spécialité

Géosciences - Direction conjointe LIEC-CRAN (C. Mustin, D. Brie)

Damien Parrello (-> 2014) - Identification des interactions bactérie-minéral à l'aide de biosenseurs - Direction LIEC (C. Mustin, P. Billard)

Publications 2013

Amorosi C., Mustin C., Frache G., Bertani P., Toniazzi V., Ruch D., Ball V., Averous L. Michel M. (2012) Design of Flexible Free Standing Plasma Polymer-Based Films As Hosts for Enzyme Immobilization *J. Phys. Chem. C*, 2012, 116 (40), 21356–21365

Esnault L., Libert M., Bildstein O., Mustin C., Marsal F., Jullien M. (2013) Impact of iron-reducing bacteria on the properties of argillites in the context of radioactive waste geological disposal. *Applied Clay Science*, 2013, 83–84, 42–49

Ghach W., Etienne M., Billard P., Jorand F.P.A., Walcarius A. (2013) Electrochemically-Assisted bacteria encapsulation in thin hybrid sol-gel film. *J. Mater. Chem. B*, 1, 1052-1059

Poirel J., Joulian C., Leyval C., Billard P. (2013) Arsenite-induced changes in abundance and expression of arsenite transporter and arsenite

oxidase genes of a soil microbial community. *Res. Microbiol.* 164(5):457-65.

Cébron A., Arsène-Ploetze F., Bauda P., Bertin P.N., Billard P., Carapito C., Devin S., Goulhen-Chollet F., Poirel J., Leyval C. (2013) Rapid impact of phenanthrene and arsenic on bacterial community structure and activities in polluted sand batches. *Microb. Ecol.* Accepted.

Zegeye A., Billard P., Mustin C. (2013) Bioreduction of Sb-substituted goethite: A mechanism for Sb mobilisation and bio-availability? Goldschmidt conference, August 25-30, Florence, Italy.

Caland F., Miron S., Brie D., Mustin C. (2012) A blind sparse approach for estimating constraint matrices in Paralind data models. *European Signal Processing, EUSIPCO 2012*, p 839 – 843

ANNEXE

Unités de recherche et formations Master



CRPG

C R P G

Le projet présenté par le CRPG pour ce nouveau terme 2013-2017 s'inscrit d'une part dans la continuité d'un laboratoire de géologie fortement ancré sur la recherche fondamentale et d'autre part dans l'évolution forte entreprise par l'ensemble des laboratoires de l'OSU OTELo. Le CRPG poursuit ses orientations scientifiques de recherches sur la formation du système solaire et le fonctionnement de la Terre par des approches couplant géochimie, pétrologie, géologie de terrain et expérimentation. Nos recherches sont majoritairement fondées sur l'utilisation de traceurs géochimiques, isotopiques ou non, permettant de déduire des facteurs géochronologiques ou réactionnels ou encore de tracer l'origine des matériaux géologiques. Le CRPG repose ainsi largement sur la mise en œuvre de moyens analytiques lourds en géochimie, en expérimentation et sur l'animation de deux services nationaux d'analyse de l'INSU.

Au plan structurel, le CRPG, Unité Propre de Recherche du CNRS depuis 50 ans, fonctionnait depuis de nombreuses années en étroite collaboration avec les universités INPL et UHP qui nous apportent la moitié de notre personnel chercheur. La montée en force des universités dans le pilotage de la recherche et la motivation de nos tutelles nous ont conduits à solliciter l'évolution du CRPG avec un statut d'UMR entre le CNRS et l'Université de Lorraine.

Au niveau local, le CRPG est l'une des composantes de l'OSU OTELo. Nous inscrivons notre politique scientifique dans le cadre de réflexion et de concertation d'OTELo en particulier pour la participation aux services communs, les relations avec les établissements d'enseignement supérieur, la définition des priorités de profils recherche des postes enseignant-chercheur, les réponses aux appels d'offres CPER, universitaires et régionaux ou encore la politique de demande d'allocations doctorales. Nous sommes partenaires des principaux projets menés à l'échelle d'OTELo : RESSOURCES21, CPER Plateforme Géochimique, ZAM, Institut Carnot ICEEL, SOERE Bure... Sur le plan de l'enseignement, nous intervenons dans les enseignements de l'école de Géologie comme dans ceux de Licence et Master et la plupart de nos doctorants appartiennent à l'école doctorale RP2E.

L'animation scientifique au CRPG est organisée autour de ses thèmes de recherche qui déterminent les choix scientifiques du centre. Cette animation assure des discussions sur l'évolution des projets, la prospective pour les réponses aux appels d'offres et offre aux doctorants un cadre d'ouverture et de réflexion ciblé.

Les recrutements des dernières années apportent au centre de nouvelles compétences et de nouveaux objectifs et ils induisent dans ce projet des évolutions thématiques. Ainsi les objectifs sur la vie primitive, la pétrologie magmatique, la tectonique ou encore les paléo-climats se renforcent. Parallèlement de nouvelles voies de recherches sont ouvertes en particulier sur l'atmosphère ou les bio-minéralisations. Ces nouvelles orientations s'inscrivent dans un cadre thématique proche de celui du quadriennal en cours avec deux thèmes directement dérivés des thèmes actuels et l'évolution du thème « Surface de notre planète » en deux thèmes. Nous avons adopté une structure en quatre thèmes :

- Cosmochimie, Terre et Vie primitives (CTVP)
- Magmas et Fluides Profonds (MFP)
- Tectonique, Érosion et Évolution du Relief (TEER)
- Cycles, Atmosphère, Climat (CAC)

Ces thèmes sont soutenus par des projets à fort financement (ERC et ANR) qui déterminent une part importante de notre activité et des actions plus modestes (INSU, etc.) qui sont essentielles pour faire émerger des projets.

Quelques projets de recherches sont en lien avec des partenaires industriels dans des domaines aussi variés que la datation des objets géologiques, le cristal ou encore les pollutions liées aux incinérateurs. Enfin, nombre de projets menés avec nos collègues d'OTELo se poursuivent sur des objectifs directement associés à ces projets en particulier dans le cadre du labex « Ressources 21 »

DIRECTEUR: Christian France-Lanord (DR1 CNRS)

<http://www.crpg.cnrs-nancy.fr>



GEORESSOURCES



Les ressources minérales comme énergétiques offrent la possibilité d'étudier des mécanismes physiques et chimiques de transferts de matière et de chaleur exacerbés combinant de nombreuses sous-disciplines des sciences de la Terre : géologie physique, hydromécanique, géochimie, minéralogie, pétrophysique, cristalochimie, mathématiques appliquées.

Afin de répondre aux interrogations scientifiques liées aux ressources minérales et énergétiques, nous avons construit le projet d'un nouveau laboratoire « GeoRessources » regroupant la plupart des forces en Géologie appliquée de Nancy issues des sections 35, 36 et 60 de la CNU et des sections 18 et 20 du CNRS. GeoRessources est un laboratoire de l'Université de Lorraine, de l'INSU et du CREGU. Les effectifs en personnel permanent dépassent la centaine (40 ITA/IATOS, 64 EC/C), pour un effectif total prévisible de plus de 180 personnes.

L'UMR GeoRessources se décline en 3 axes de recherche :

- Axe « GéoModèles » : lieu de rencontre des spécialistes des modèles géométriques, géostatistiques et de processus physiques. L'objectif est de créer des interactions fortes entre spécialistes de la simulation numérique et de la simulation expérimentale, de coupler les approches géométriques, inverses, hydrogéochimiques et mécaniques.
- Axe « Matières Premières » : lieu d'interaction et d'échanges entre les spécialistes des ressources carbonées et minérales pour leur exploration, exploitation et valorisation. Ici se mêleront des géologues, géochimistes, métallogénistes et minéralurgistes. Ils auront pour mission de développer des modèles, voire des pilotes, couvrant l'amont et l'aval du cycle des ressources.
- Axe « GéoSystèmes » : lieu de synergie où se retrouvent les spécialistes de l'exploitation du sous-sol à des fins de stockage d'effluents ou déchets ultimes et de géothermie et les spécialistes des aléas et des risques générés par les activités anthropiques, comme les excavations et les mines.

Parce que l'exploitation des ressources ne se fera plus comme avant, il est nécessaire de réunir l'ensemble des intervenants

des axes thématiques pour accompagner des activités de recherche sur l'impact environnemental de l'exploitation des ressources où leur expertise est essentielle. Les effets sur l'homme et l'environnement seront aussi traités en étroite relation avec les laboratoires LIEC et LSE de l'OSU OTELo.

L'UMR GeoRessources est membre de l'OSU OTELo, de l'Institut Carnot ICEEL, du labex RESSOURCES21 et de l'IEED Géoénergies. L'UMR GeoRessources s'appuie sur deux centres de transfert, l'ASGA et le CREGU, qui facilitent les relations avec nos partenaires industriels. AREVA et TOTAL, actionnaires du CREGU, ont souhaité être associés à GeoRessources via la tutelle CREGU. D'autres industriels sont d'ores et déjà partenaires de GeoRessources par leur participation au consortium GOCAD et au projet STEVAL. Les EPIC (BRGM, INERIS, ANDRA, IFPen, IFREMER) ont souhaité développer des partenariats forts, certains ont déjà prévu de détacher du personnel sur le site de GeoRessources.

Les laboratoires de l'UMR GeoRessources se répartissent sur trois campus : le campus ARTEM en lien étroit avec l'École des Mines et l'INERIS, le campus Sciences-Aiguillettes où se localise sa Direction et le campus Brabois sur le périmètre de l'École de Géologie.

Le laboratoire GeoRessources, UMR 7359, résulte du regroupement de personnels issus de quatre laboratoires :

- Géologie et Gestion des Ressources Minérales et Energétiques (G2R) UMR 7566 ;
- Centre de Recherches Péetrographiques et Géochimiques (CRPG), UPR 2300 ;
- Laboratoire Environnement, Géomécanique et Ouvrages (LAEGO), EA 1145 ;
- Laboratoire Environnement et Minéralogie (LEM), UMR 7569.

Ainsi que le service commun de microscopie électronique et de microanalyses (SCMEM) de l'Université de Lorraine.

DIRECTEUR: Jacques Pironon (DR CNRS)

DIRECTEURS-ADJOINTS: Anne-Sylvie André-Mayer (PR UL), Philippe De Donato (DR CNRS)

<http://georessources.univ-lorraine.fr/>



Le Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux (LIEC), UMR 7360 CNRS-Université de Lorraine, créé en janvier 2013 par fusion du LIEBE, du LIMOS et du LEM (pour partie) constitue un pôle majeur de la recherche environnementale en Lorraine, dédiée à l'étude des écosystèmes continentaux fortement perturbés, en vue de leur gestion durable.

Ces écosystèmes font partie de la « zone critique ». Située entre le sommet de la canopée et la base des sols, au contact avec les roches-mères, celle-ci héberge les échanges complexes entre sols, eau, air et organismes vivants, qui régulent l'évolution du paysage, le développement de la biomasse, la fertilité des écosystèmes (notamment agricoles), la purification de l'eau et de l'air. Les écosystèmes continentaux constituent ainsi un élément clef des cycles biogéochimiques et du bien-être sociétal. Ils sont fortement sensibles aux perturbations anthropiques ou aux forçages climatiques. Enfin, ils constituent un immense réservoir pour les éco-technologies (processus, biodiversité...) et pour l'ingénierie écologique (remédiation).

Notre approche de ces systèmes extrêmement complexes et d'une grande variabilité spatio-temporelle se veut résolument inter-disciplinaire, en combinant nos compétences en écotoxicologie intégrative, écologie fonctionnelle, biogéochimie des sols et des eaux, physico-chimie environnementale. Cinq questions-projets stratégiques, sur lesquelles chercheurs, enseignants-chercheurs, doctorants et ingénieurs se répartissent, sont au coeur de notre projet scientifique :

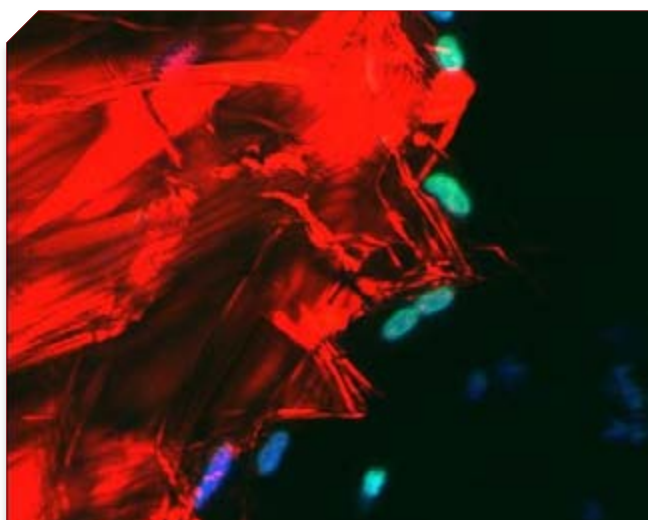


Image en microscopie confocale de bactéries altérant un grain de silicate



Prélèvements benthiques (Vosges)

Deux questions à fort cadrage scientifique, avec l'ambition de lever les principaux verrous liés à la complexité et à la variabilité spatio-temporelle des milieux naturels :

- Diversités et interactions biotiques et abiotiques
- Théorie et modélisation intégrée des systèmes

Deux questions au carrefour des problématiques scientifiques et sociétales :

- Eco-dynamique et éco-toxicité des contaminants
- Fonctionnement des écosystèmes perturbés

Une question à fort cadrage contextuel, dédiée à l'application des connaissances :

- Caractérisation et remédiation des milieux anthropisés

Le LIEC compte 91 permanents et 35 doctorants. Il est localisé sur 4 sites : Vandoeuvre Pôle de l'eau-Charmois, Vandoeuvre Campus Sciences-Aiguillettes, Metz Campus Bridoux, Thionville-Yutz IUT.

Le LIEC fait partie de l'OSU Observatoire Terre et environnement de Lorraine (OTELo) dont il assure une partie importante des missions d'observation. Sa forte insertion régionale se manifeste au travers de grands programmes régionaux d'étude et de gestion des sites dégradés et des territoires en mutation : Zone atelier du bassin de la Moselle (ZAM), Groupement d'intérêt scientifique sur les friches industrielles (GISFI), Observatoire pérenne de l'environnement (OPE) de l'ANDRA autour du site de stockage de Bure. Des partenariats durables sont engagés avec les Agences de l'eau et l'ONEMA.

DIRECTEUR: Fabien Thomas (DR1 CNRS)

DIRECTRICES ADJOINTES: Pascale Bauda (PR1), Corinne Leyval (DR1 CNRS).

<http://liec.univ-lorraine.fr/>



LSE

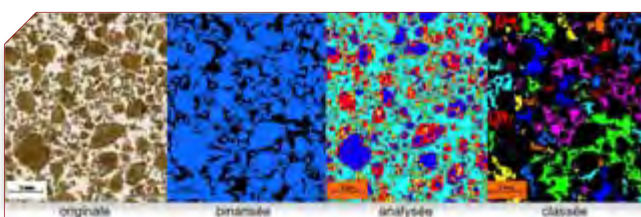
Le Laboratoire Sols et Environnement (LSE) est une unité mixte de recherche INRA (Département Environnement et Agronomie) – Université de Lorraine (UMR 1120). L'unité est constituée de deux équipes, à ancrages disciplinaires ciblés en pédologie (Technosols) et en agronomie des milieux anthropisés (Phytoremédiation). La double ambition de l'unité est alors de produire des connaissances génériques sur le fonctionnement et l'évolution des sols au sein d'écosystèmes fortement modifiés par les activités humaines et de proposer des voies d'optimisation de la gestion des sols. Les recherches prévues de 2013 à 2017 trouvent leur principale actualisation dans une contribution plus forte au développement de l'agro-écologie pour la gestion et la restauration des sites et sols dégradés. Pour les cinq années à venir, l'unité a ainsi deux objectifs principaux : i) comprendre et modéliser le fonctionnement et l'évolution des sols très anthropisés, avec un intérêt particulier pour les Technosols et notamment ceux issus de la construction pour la restauration des écosystèmes dégradés et ii) comprendre et modéliser le fonctionnement des plantes d'intérêt pour le traitement des milieux pollués et dégradés, en focalisant sur la phytoextraction des métaux et la rhizoatténuation des polluants organiques.

En « pédologie des milieux très anthropisés » l'unité se consacre plus particulièrement à i) contribuer à l'inventaire des sols très anthropisés et à la caractérisation de leur fonctionnement et ii) de comprendre et modéliser l'évolution pédogénétique des sols très anthropisés, notamment celle des Technosols avec des contributions à la plateforme Sol Virtuel de l'INRA et généralisation des résultats à l'ensemble des sols.

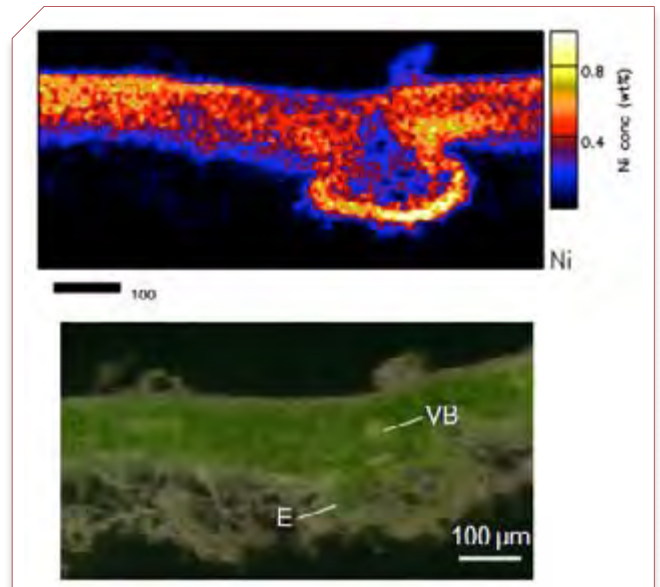
L'approche multicritère ainsi développée devra permettre de quantifier l'effet de l'anthropisation sur le fonctionnement des sols et de définir ainsi le gradient d'anthropisation. Les



Technosol développé à partir de déchets de l'activité sidérurgique
(crédit photographique – Hermine Huot, LSE)



Quantification par analyse d'image, de la porosité et de l'agrégation au sein d'un Technosol construit (crédit photographique – Nouhou Salifou Jangorzo, LSE)



Distribution du Ni dans une section de feuille de la plante hyperaccumulatrice *Berkheya coddii* - MicroPIXE (crédit photographique – Guillaume Echevarria, LSE)

finalités des recherches sont de gérer le compartiment sol des sites dégradés (p. ex. urbains, industriels et miniers) et de contribuer au développement du génie pédologique pour leur requalification (p. ex. construction de sol).

En « Agronomie des sols très anthropisés », les objectifs de recherche sont de i) comprendre et contrôler la disponibilité des polluants et ii) comprendre et décrire l'écophysiologie des cultures dans les sols très anthropisés.

Les finalités des recherches sont de valoriser par les cultures, les sites et sols dégradés, de gérer les pollutions (phytoremédiation), de produire de la biomasse végétale à valeur ajoutée (alimentaire et non alimentaire) et de récupérer et valoriser des métaux stratégiques (phytomine).

Faisant partie des trois unités dont la recherche relève de la Science du Sol en Lorraine, le LSE s'est rapproché, en 1996, du groupe géosciences de Lorraine, en intégrant l'ILG, devenu FR EST (2004), enfin OSU OTELo (2010). L'investissement dans les questions relatives à l'anthropisation aigüe des sols et leur remédiation a amené l'unité à contribuer à la création du GISFI, dispositif pluridisciplinaire qui a permis la structuration, en Lorraine, de la recherche dans le domaine des sols très anthropisés, leur connaissance et leur gestion. L'unité est aussi très impliquée dans le LabEx « RESSOURCES21 », en y développant deux volets finalisés, qui découlent de ses recherches : i) phytomine des éléments d'intérêt et ii) restauration des sites miniers dégradés.

DIRECTEUR: Christophe Schwartz (PR UL)
<http://lse.univ-lorraine.fr/>



Couvert végétal de l'hyperaccumulateur de Ni *Alyssum murale* au champ
(crédit photographique – Guillaume Echevarria, LSE)

MASTERS

ERASMUS MUNDUS EMERALD

SITE INTERNET: <http://www.emerald.ulg.ac.be/>
RESPONSABLE: E. PIRARD - eric.pirard@ulg.ac.be
emerald@ulg.ac.be



The program is designed to focus on the following major aspects of georesources engineering: characterisation, processing, modelling and management. Focussing on industrial needs, bridge the gap between georesources and advanced processing technologies, give students an in-depth knowledge of mineral resources, co-products, and most recent and modern techniques of processing, promote an effective and environmentally friendly management, these are some of EMerald goals.

MATIÈRES PREMIÈRES MINÉRALES, INGÉNIERIE ET MANAGEMENT DES RISQUES

SITE INTERNET: <http://www.mines-nancy.univ-lorraine.fr/>
RESPONSABLES: A. GRAESEL – Alain.Graesel@univ-lorraine.fr
 P. MARION – Philippe.Marion@univ-lorraine.fr
SECRÉTARIAT: A. GALAUSIAUX +33 (0)3.55.66.26.82
anne.galausiaux@univ-lorraine.fr



La formation débouche sur un Master à finalité professionnelle dans le domaine des Mines et des Carrières. La formation proposée est orientée vers l'ensemble du cycle de l'exploitation des minerais qui va de la reconnaissance des gisements au traitement et au recyclage des résidus miniers, en passant par les méthodes d'exploitation. Un accent fort est mis sur la prévention des risques pour l'Homme et la protection de l'environnement. La formation s'appuie sur des visites de sites industriels et sur des expérimentations sur plateformes industrielles.

SUBTERRANEAN RESERVOIRS OF ENERGY: HYDRO-DYNAMICS - GEOLOGY - MODELLING

SITE INTERNET: <http://master-sre.formation.univ-lorraine.fr/>
RESPONSABLES: M. PANFILOV – ENSG
mikhail.panfilov@univ-lorraine.fr
 A. PEREIRA – ENSEM –
antonio.pereira@univ-lorraine.fr
SECRÉTARIAT: S. FANTIN +33 (0)3 55 66 26 82
sandie.fantin@univ-lorraine.fr



The objective of this Master program is to train specialists for combined engineering and scientific careers in :

- Conventional energy resources: oil, gas, uranium leaching;
- Non-conventional geoenergies: bitumen, shale gas, gas hydrates, coalbed methane, geothermy; tight gas reservoirs;
- Underground storages of natural gas, CO₂, hydrogen, electricity
- Hydro-thermodynamics of exploitation of different types of subterranean energy reservoirs.
- Engineering methods of predicting, controlling, modelling, and optimising recovery scenarios;
- Simulation and 3D-modelling of reservoir geological structures and reservoir dynamic processes.
- Reservoir geology and geophysics.

ENVIRONNEMENT ECOTOXICOLOGIE ECOSYSTÈMES

SITE INTERNET: <http://univ-lorraine.fr>, Rubrique « étudier à l'UL »

RESPONSABLE: C. COSSU-LEGUILLE - carole.leguille@univ-lorraine.fr

SECRÉTARIAT: N. KLEINEN - 03.87.37.84.44
nathalie.kleinen@univ-lorraine.fr

- Ecotoxicologie et Ecologie des Systèmes Anthropisés – C. Cossu-Leguille
- Génie de l'Environnement – S. Cotelte
- Gestion des Milieux Aquatiques Continentaux, Restauration et Conservation – G. Masson

La mention Environnement Ecotoxicologie Ecosystèmes regroupe trois spécialités interdisciplinaires et complémentaires qui bénéficient de compétences scientifiques et pédagogiques présentes à l'université de Lorraine dans le domaine de l'environnement, compétences qui relèvent à la fois des sciences du vivant, des sciences de terre, de la chimie et de l'hydrologie.



GÉNIE CIVIL

SITE INTERNET: <http://univ-lorraine.fr>, Rubrique « étudier à l'UL »

RESPONSABLE: A. LECOMTE - andre.lecomte@univ-lorraine.fr

- Architecture, Bois, Construction – C. Rogauze
- Construction, Environnement, Management – M. Hattab
- Géotechnique, Eau, Risques – A. Giraud
- Structures, Matériaux, Énergétique du Bâtiment – R. Benelmir

L'objectif est de former des cadres ayant les connaissances scientifiques, techniques et économiques nécessaires pour pouvoir prendre en charge ou diriger les études de conception, de dimensionnement, de diagnostic ou d'exécution des divers ouvrages du BTP, dans les entreprises, les bureaux d'ingénierie et les laboratoires d'application ou de recherche.



INGÉNIERIE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

SITE INTERNET : <http://www.isi.u-nancy.fr/>

RESPONSABLE : L. PERRIN Laurent.Perrin@univ-lorraine.fr

SECRÉTARIAT : T. DALSTEIN - 03.83.59.56.72
Thierry.Dalstein@univ-lorraine.fr

- Sécurité des Procédés Industriels, Environnement et Qualité – L. Perrin
- Ingénierie Durable de l'Environnement – G. Echevarria

Ce Master est destiné à former des spécialistes capables de prendre en compte les impératifs du développement durable, des procédés pour l'environnement, de la maîtrise des risques lors de la conception et de l'utilisation de systèmes industriels, technologiques ou organisationnels sûrs. Ces objectifs sont à la fois scientifiques et professionnalisant et prennent bien en considération le projet professionnel de l'étudiant.



MASTER SPÉCIALISÉ EN GESTION, TRAITEMENT ET VALORISATION DES DÉCHETS

SITE INTERNET: <http://engees.unistra.fr/site/formation/masteres-specialises/gestion-traitement-et-valorisation-des-dechets-gede/>

C'est une formation à orientation professionnelle dispensée sur un an. Elle vise à former les futurs chefs de projet dans les domaines de l'eau et de l'assainissement, pour un public mixte, d'étudiants et de professionnels.

Cette formation permet d'acquérir une spécialisation technique dans le domaine de la gestion des déchets : prévention, collecte, traitement et valorisation.

2 options : déchets urbains et déchets industriels précédées d'un tronc commun qui se déroule à Strasbourg au premier trimestre.

L'École des Mines de Nancy a la responsabilité pédagogique de l'option « déchets Industriels » et l'ENGEES, celle de l'option « déchets urbains ».



