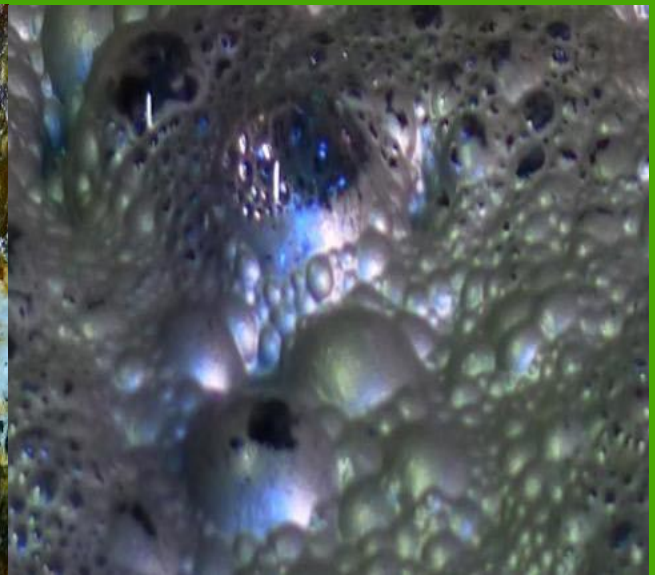




Ecole thématique CNRS
Cycle Géochimique des Métaux



2 – 4 Octobre 2018

Nancy



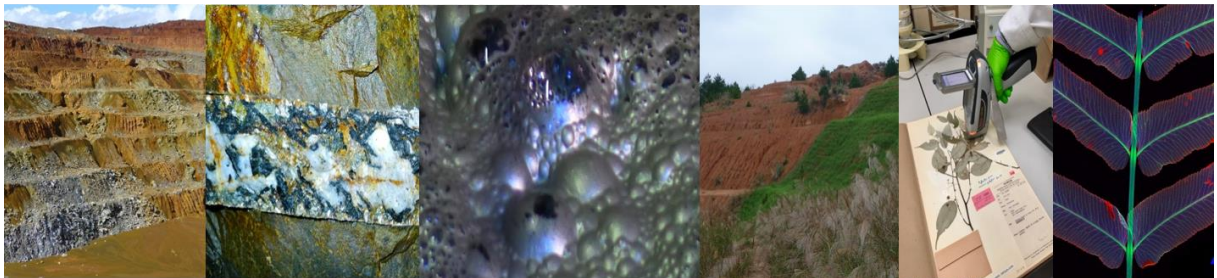
UNIVERSITÉ
DE LORRAINE



Observatoire Terre Environnement Lorraine



Ecole Thématique CNRS



Cycle Géochimique des Métaux *2 – 4 Octobre 2018* *Nancy*

Objectifs et contexte de l'Ecole thématique

L'Ecole Thématique du CNRS sur les Ressources Minérales, a été créée à Nancy en 2010, suite à la réévaluation du secteur minier européen et mondial, et en particulier face à l'émergence des besoins en métaux stratégiques, incluant les terres rares, Nb-Ta, In, Ge, Ga, Ti et Ni, Co, Sc. Après 6 éditions, cette formule est appréciée par l'ensemble de la communauté travaillant dans ces thématiques de recherche. Elle répond à un besoin de formation des jeunes chercheurs et doctorants de ce domaine. Elle est aussi l'occasion d'échanges fructueux entre chercheurs seniors et jeunes étudiants, afin de transmettre les connaissances et les nouvelles voies de recherche.

Cette année, l'école désire s'inscrire dans une démarche incluant l'ensemble des aspects pluridisciplinaires reliés aux Ressources Minérales. Dans un contexte global où le recyclage ne permet pas à lui seul de faire face à la demande croissante de métaux pour les techniques de la transition énergétique et des innovations technologiques, des progrès significatifs ont été réalisés ces dernières années dans l'intégration des connaissances autour du cycle de vie des métaux. Ainsi ont été développées des passerelles entre les savoirs disciplinaires, en particulier autour de la prospection, l'exploitation, la valorisation des minerais, la prévision de l'impact environnemental et sociétal du développement minier. Ce sont ces progrès qui seront illustrés de manière intégrée par l'école thématique « Cycle Géochimique des Métaux ».

L'école thématique **Ressources Minérales : Cycle géochimique des métaux** est articulée autour du cycle de vie des métaux, qui constitue aussi le socle des grandes thématiques pluridisciplinaires du LabEx Ressources 21 des laboratoires Géosciences de Lorraine regroupés dans l'OSU OTELO, visant à caractériser les cycles naturels et anthropiques des métaux, ce qui correspond à la vision intégrée, typiquement européenne du cycle de la matière.

Elle prend en compte la caractérisation géologique des métaux stratégiques et leurs gisements (formation des minerais métalliques dans la lithosphère), la valorisation innovante et écoresponsable des minerais (traitements innovants des minerais par flottation et hydrométallurgie), l'agromine (le transfert des métaux du sol vers les plantes et les capacités de valorisation de cette approche), la prévision et le suivi du comportement des éléments métalliques dans l'environnement (impact écotoxicologique), et enfin, l'aspect sociétal lié à l'ensemble de ces thématiques.

Les objectifs scientifiques de cette école sont construits autour de l'intégration des connaissances sur le cycle de vie des métaux et sur la nécessité de développer des passerelles entre les savoirs disciplinaires autour de la prospection, l'exploitation, la valorisation des minerais, et la prévision de l'impact environnemental et sociétal du développement minier.

Remerciements

Cette Ecole Thématique du CNRS sur les Ressources Minérales n'aurait pas été possible sans le concours et l'aide technique et financière :

- du **CNRS : Le Service de la Formation de l'INSU**, et pour la mise en oeuvre de l'Ecole, la Délégation régionale N° 6 , Cécile Dolmaire, Nathalie Ohl et Stéphanie Girardin
- de **GeoRessources** pour la gestion administrative de l'Ecole, Camille Gagny, Aurélie Defeux et Patrick Lagrange
- du **Labex Ressources 21, en particulier les membres du Comité Recherche**,
- de la **Faculté des Sciences et techniques**, qui a mis à disposition ses locaux,
- des **laboratoires OTELO** sont remerciés pour l'organisation des visites du jeudi 4 Octobre.

-et des sponsors suivants :

- **Orano** : en particulier nous remercions Marie-Laure Lefébure, Service de la Communication d'Orano MN, et Gilbert Stein, VP Geosciences BU Mines.
- La **KIC Raw Materials**, en particulier Didier Zimmermann, pour sa contribution et l'aide financière de la KIC.
- le **CREGU**, pour le soutien à l'inscription des étudiants de GeoRessources.

Tous les orateurs, participants aux tables rondes, et étudiants sont remerciés pour leurs contributions à l'excellente tenue scientifique des résumés et des présentations.

Programme de l'Ecole thématique
« Ressources Minérales : Cycle géochimique des métaux »

Mardi 2 Octobre	Mercredi 3 octobre	Jeudi 4 octobre	Jeudi 4 octobre
Accueil Mots de Bienvenue	Eléments métalliques dans l'environnement, et impact écotoxicologique	GeoRessources 9-12h FST Analyse localisée et Imagerie, Techniques Spectroscopiques Raman et Infra-Rouge Instruments d'exploration portables	GeoRessources 9-12h Bâtiment A Steval et Hydroval
Systèmes métallogéniques et cycle crustal des métaux	Table ronde : Les métiers autour des ressources minérales - Vision à 20 ans, avec des représentants des formations et de l'industrie		
<i>Déjeuner</i>	<i>Déjeuner</i>	<i>Déjeuner</i>	<i>Déjeuner</i>
Valorisation innovante et éco- responsable des minerais	Agromine et réhabilitation des sols miniers Table ronde : Retours d'expérience sur la concertation dans le domaine minier	GeoRessources 13h30-16h Batiments E et F Modélisation numérique	CRPG 13h30-16h Datation Sonde ionique MCC-ICPMS Isotopie-SARM Spectrométrie Gaz rares
<i>Posters et rafraichissements</i>	<i>Posters et rafraichissements</i>		

Mardi 2 Octobre 2018



Mine de W-Sn-Cu (Panasqueira) : granite et flottation de la chalcoppyrite

Mardi 2 octobre 2018

8h30-9h30 Accueil café, Mots de bienvenue – Michel Cathelineau

Session Systèmes métallogéniques et cycle crustal des métaux

9h30-10h10 **M. Jébrak**, UQAM : Métallogénie constructiviste ou criticalité auto-organisée ?

Comment les modèles génétiques façonnent la future disponibilité des métaux

10h10-10h40 **Isabelle Duhamel-Achin**, BRGM : Les nouveaux défis de la prospection des métaux en France, perspectives d'avenir ou voie sans issue ?

10h40-11h10 **Philippe Boulvais**, Geosciences Rennes : Le gisement de Terres Rares de Gakara, Burundi : un gisement de classe chinoise...

11h10-11h40 **Laurent Truche**, IsTerre Grenoble : Transport, dépôt des métaux dans les bassins sédimentaires : le rôle des saumures, des hydrocarbures et du cycle du soufre.

11h40-12h10 Les recherches en cours par les doctorants

Présentations courtes de 3 minutes :

- **E. Carocci**, C. Marignac, M. Cathelineau, M.-C. Boiron, C. Peiffert, and F. Pinto: First depositional stage of wolframite at W-Sn-Cu Panasqueira mine (Portugal): fluids indirect characterization through early tourmaline studied

- **W. M.-E. Bonzi**, K. A.-A. Hema, M. Van Lichtervelde, A.-S. André-Mayer, S. Salvi, O. Vanderhaeghe, U. Wenmenga: Signatures géochimiques des micas et minéraux accessoires de pegmatites à métaux rares de Mangodara (Burkina Faso)

- **A. Cugerone**, B. Cenki-tok, E. Oliot, A. Chauvet, K. Kouzmanov, S. Salvi, D. Beziat, E. Le Goff, M. Munoz, Critical metals in Pb-Zn ores: Unravelling tectono-metamorphic processes generating Ge mineralization in the Variscan Pyrenean Axial Zone

- **J. Gigon**, A. Richard, J. Mercadier, I. R. Annesley, R.G. Skirrow, A. S. Wygralak, M. A. Kendrick : Nouvelles données sur les minéralisations en U, Pb et Zn dans le bassin de McArthur (Australie)

- **J. Perret**, A.-S. André-Mayer, J. Feneyrol, L. Ciancaleoni, R. Bosc, C. Peiffert, C. Tucker Barrie: Remobilization of the primary metallic concentration at the Hadal Awatib East Au-Cu ($\pm$ Zn-Ag) VMS deposit, Red Sea Hills, NE Sudan

- **V. Combes**, A.-S. Andre-Mayer, and A. Eglinger: Deformation stages versus gold events at the Yaou polyphased gold deposit, French Guiana: constraints from veins, pyrite, alteration and microtectonic studies

- **A. Jeanvoine**, G. Chazot, E. Pelleter, Y. Fouquet, B. Guéguen, J. Langlade, Comportement des métaux dans les magmas d'arrière arc : nouvelles contraintes apportées par la zone Futuna

- **R. Coltat**, P. Boulvais, Y. Branquet, E. Pelleter : Système métallogénique d'une transition Océan-Continent : analogie avec les systèmes actuels Marmorera/Cotschen, nappe de Platta, Alpes Suisses.

- **M. Turuani**, Caractérisation des brannérites (UTi₂O₆) : étude texturale, géochimique et cristallographique de l'altération naturelle : Implications pour la compréhension des processus de remobilisation de l'U et pour l'optimisation des procédés de lixiviation

12h10-12h30 Discussion & conclusion

Session Valorisation innovante et éco-responsable des minerais

14h-14h40 **Alexandre Chagnes**, GeoRessources : Introduction à la métallurgie extractive pour le traitement des minerais et des résidus

14h40-15h10 Eric Meux, Institut Jean Lamour : Application de la métallurgie extractive au recyclage

15h10-15h40 Vincent Pomarède, ERAMET : Application de la métallurgie extractive à la valorisation du nickel et du cobalt contenus dans les gisements primaires

15h40-16h10 Lucian Doru Dascalescu, Université de Poitiers : Procédés physiques de séparation de mélanges granulaires ou pulvérulents (de matériaux provenant des déchets industriels).

16h10-16h40 Les recherches en cours par les doctorants

Présentations courtes de 3 minutes :

- **N. Djoudi**, M. Le Page Mostefa, H. Muhr : Etude de la précipitation de sels de cobalt en vue de la récupération dans des lixiviats

- **M. Herbelin**, J. Bascou, V. Lavastre, D. Guillaume, F. Astolfi : Suivi des propriétés chimiques, minéralogiques et magnétiques des laitiers d'aciérie à four électrique (LAFE) au cours de leur altération

- **A. Geneyton**, L. Filippov, N. Menad: A new insight in the mechanism of carboxylate adsorption on the monazite surface

- **Y. Foucaud**, Q. Dehaine, I. Filippova, L. Filippov : Processing a complex W ore by pre-concentrating with a Falcon concentrator prior to flotation

16h45-17h30 Didier Zimmermann, EIT Raw Materials, Metz, Un écosystème favorable à l'innovation dans le domaine des Matières premières minérales, des métaux et des matériaux fonctionnels

17h30-18h Discussion & conclusion

18h-19h Posters& Rafrachissements offerts par la KIC Raw Materials

Métallogénie constructiviste ou criticalité auto-organisée ?

Comment les modèles génétiques façonnent la future disponibilité des métaux

Jébrak, Michel^{1*}

¹ UQAM, Sciences de la Terre et de l'atmosphère, CP 8888 centre-ville, Montréal (QC) H4A1N4
Canada & Réseau Mines et Société, Université de Lorraine, France.

La baisse du taux de découverte minières à l'échelle mondiale interpelle les géosciences. Malgré plus d'un siècle de recherches géologiques et géochimiques à toutes les échelles, on comprend encore fort mal la genèse des gîtes minéraux : les travaux ont permis de déterminer les conditions de dépôts, les mécanismes de transport et de définir des environnements géologiques favorables. Mais deux volets majeurs restent cependant à élucider : (1) la nature des sources de la plupart des concentrations de métaux, et (2) la dynamique des processus de concentrations.

Deux approches dynamiques sont sous-jacentes à la plupart des travaux du domaine : l'une s'appuie sur une démarche physique, et l'autre sur une démarche à caractère historique. La démarche physique fait l'hypothèse que la genèse des gisements est un processus exceptionnel qui résulte de systèmes auto-organisés. Dans sa déclinaison du 21^{ème} siècle, les gisements résulteraient de processus d'accumulation énergétique et de matériaux sous des barrières physiques qui concentrent et relâchent les vecteurs des minéralisations (McCuaig et Hronsky, 2014). Le système s'ouvre à l'état critique de manière transitoire, ce qui produit des distributions de type fractal : loi de Lasky pour la distribution des teneurs et des tonnages, distribution inégale des gisements, géométrie des objets...

La démarche historique considère que c'est le rare cumul de divers processus normaux qui conduit au caractère exceptionnel des gisements. Les gisements se construisent donc au cours du temps par une focalisation des concentrations par étapes multiples jusqu'à les rendre exploitables (Routhier, 1969; Meffre et al., 2016). Il existe donc une généalogie des gisements, des héritages successifs. Les distributions fractales reflètent alors des probabilités de superposition.

Ces deux démarches s'opposent sur bien des points : elles induisent différents rapports des gisements aux temps géologiques, elles conduisent à des démarches scientifiques contrastées, et elles sous-tendent des stratégies d'exploration distinctes. In fine, la compréhension de distribution des ressources minérales de la Terre nécessitera sans doute une combinaison des démarches physiques et historiques.

Références :

McCuaig, T.C. et Hronsky, J.M.S. (2014) SEG, Sp. Pub. 18 : 153-175

Meffre, S., et al. (2016) Ore Geology Reviews 76 : 268–279

Routhier, P. (1969) Essai critique sur les méthodes de la Géologie (de l'objet à la genèse), Masson

Les nouveaux défis de la prospection des métaux en France, perspectives d'avenir ou voie sans issue ?

Isabelle Duhamel-Achin^{1*}

¹ BRGM, 3 avenue C. Guillemin BP 36009, 45 060 Orléans Cedex 2 - France

* i.duhamelachin@brgm.fr

Sur ces 30 dernières années, les techniques de prospection et d'exploration des métaux ont beaucoup évoluées grâce aux avancées des nouvelles technologies du numérique et des instruments analytiques de terrain et de laboratoire. Ces avancées ont amené à faire évoluer le métier de géologue d'exploration. Ainsi, il doit s'adapter aux nouveaux domaines d'activités en plein essor comme l'instrumentation portable ou embarquée sur drones, l'automatisation des bancs d'analyse des carottes et des microscopes, la modélisation 3D des gîtes et des processus hydrothermaux et le Big Data Mining. Ces méthodes et techniques doivent nécessairement être appréhendées car elles amènent des avantages indéniables à la profession en terme de compétitivité, de rapidité et d'efficacité pour l'exploration.

Grâce aux moyens de communication globalisés, la nouvelle génération connectée a maintenant accès à un flot d'information géologiques et minières qu'il n'est possible de recueillir, traiter et analyser qu'avec l'aide d'outils d'analyse décisionnelle. Un des défis à relever correspond à la hiérarchisation des nouvelles données récoltées et au croisement des multiples sources d'information pour dégager des indicateurs raisonnés qui aient un sens géologique et qui permettent l'émergence de nouvelles pistes d'exploration. Ce changement de paradigme offre une meilleure compréhension des modèles de formation des gisements nécessaire au développement des techniques de prédictivité pour une prospection tactique ciblée.

En France, bien que ces progrès technologiques soient maîtrisés par nos géologues, la reprise de la prospection des ressources minérales n'en reste pas moins encore balbutiante. D'après l'application des dernières techniques de cartographie prédictive, le potentiel minier est pourtant toujours présent et avéré sur notre territoire. Cependant, le passé minier français marque encore les esprits et les populations locales des zones les plus prometteuses sont parfois réticentes à l'exploitation des ressources de leur sous-sol. Le principal défi consiste donc maintenant à faire participer les parties-prenantes des territoires aux différentes étapes du processus minier, ainsi qu'à démontrer l'apport des progrès de l'industrie extractive en matière de prévention des risques pour l'environnement et la santé des habitants.

La recherche des sous-produits valorisables dans les exploitations actuelles ainsi que la ré-exploitation des résidus miniers français peuvent s'avérer être une opportunité pour redynamiser ce secteur. Bien que ces voies annexes ne répondront pas à la croissance des besoins d'approvisionnement en matières premières de nos filières métallurgiques, elles permettront cependant de revaloriser l'image de l'industrie minière, sinon de convaincre que l'exploration et l'exploitation peuvent être menées de manière plus responsable qu'auparavant, dans un esprit de développement durable en réduisant notablement les impacts actuellement déportés dans les autres pays producteurs.

Le gisement de Terres Rares de Gakara, Burundi : un gisement de classe chinoise...

Philippe Boulvais^{1*}, Seconde Ntiharirizwa^{1,2}, Yannick Branquet^{1,3}, Marc Poujol¹, Vanessa Elongo¹, Marie-Christine Boiron⁴, Michel Cathelineau⁴, Gilbert Midende^{2,5}, Cesare Morelli⁵, Joel Ntungwanayo⁵

¹ Géosciences Rennes-UMR 6118, University Rennes, CNRS, F-35000 Rennes, France

² Earth Sciences Department, University of Burundi, 2700 Bujumbura, Burundi

³ Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO) Université d'Orléans · CNRS · BRGM, UMR 7327, 1A rue de la Férollerie, CS 20066, F-45071 Orléans Cedex 2, France

⁴ UMR GEORESSOURCES 7359 CNRS – CREGU BP 20023 54501 Vandoeuvre les Nancy cedex, France

⁵ Rainbow Rare Earths, 3 Boulevard du Japon, Bujumbura 556, Burundi

* philippe.boulvais@univ-rennes1.fr

La demande mondiale grandissante en Eléments de Terres Rares (ETR), couplée au monopole chinois, ont motivé la réouverture et l'exploitation des anciens gisements de la région de Gakara au Burundi. Ces gisements sont situés près du lac Tanganyika, sur le flanc abrupt du rift est-africain à l'ouest du Burundi, à environ 20 km au sud de Bujumbura, la capitale. Par sa richesse en Eléments de Terres Rares (ETR), par les réserves pressenties, par son affinité probable avec un magmatisme d'affinité alcaline, voire carbonatitique, le gisement de Gakara mérite une appellation de « classe chinoise ». La gîtologie et le modèle métallogénique de ces concentrations d'ETR restent néanmoins mal connus ; notre travail vise à en améliorer les lignes principales. Ces gisements et indices d'ETR consistent en un système de veines à bastnaésite (fluoro-carbonate d'ETR) et monazite (phosphate d'ETR) principalement. Nous avons raffiné la séquence paragénétique qui montre en particulier un remplacement de bastnaésite primaire par la monazite, le minerai variant d'un pôle à bastnaésite pure à un pôle à monazite presque pure (Ntiharirizwa et al., 2018). Les veines s'étendent sur plusieurs dizaines de mètres de long avec des épaisseurs variant du centimètre au décimètre. Les roches encaissantes de la minéralisation sont principalement des orthogneiss recoupés par un réseau dense de pegmatites déformées, l'ensemble correspondant à un socle Kibarien, stabilisé vers -1 milliard d'années. Les veines minéralisées recoupent les roches encaissantes en suivant différents contrôles structuraux hérités (Ntiharirizwa et al., 2018), que nous détaillerons. Les âges que nous avons obtenus par U-Th-Pb sur bastnaésite et monazite montrent que la minéralisation, et son altération secondaire, sont panafricaines (autour de 600 Ma) ; l'événement minéralisateur en ETR est donc 400 Ma plus jeune que les derniers événements de l'orogénèse kibarienne. Nous présenterons également les éléments géométriques, minéralogiques, géochimiques des minéralisations (inclusions fluides et isotopes stables de O et C sur bastnaésite ; travaux en cours), qui permettent d'améliorer notre connaissance de la formation du gisement.

References:

Ntiharirizwa et al. (2018) Minerals, 8, 394; doi:10.3390/min8090394

Transport et dépôt des métaux dans les bassins sédimentaires: le rôle des saumures, des hydrocarbures et du cycle du soufre

Laurent Truche^{1*}

¹ ISTerre, CNRS, Université Grenoble Alpes, 1381 rue de la Piscine, Grenoble, 38400, France

* auteur pour la correspondance : laurent.truche@univ-grenoble-alpes.fr

Les bassins sédimentaires hébergent la plus grande partie des ressources mondiales en plomb, en zinc, en argent et en uranium. Ils représentent également des ressources considérables en cuivre et en métaux critiques tels que le germanium, le rhénium, le vanadium ou encore le molybdène. Cette grande diversité en terme de types de gisements reflète pourtant des points communs notamment sur la composition des fluides géologiques et sur le rôle quasi ubiquiste du soufre. Au cours de cet exposé, nous explorerons ces processus minéralisateurs exceptionnels et nous révélerons comment saumures de bassins, hydrocarbures et cycle du soufre agissent de concert pour produire certaines des plus grandes anomalies géochimiques rencontrées dans la croûte terrestre.

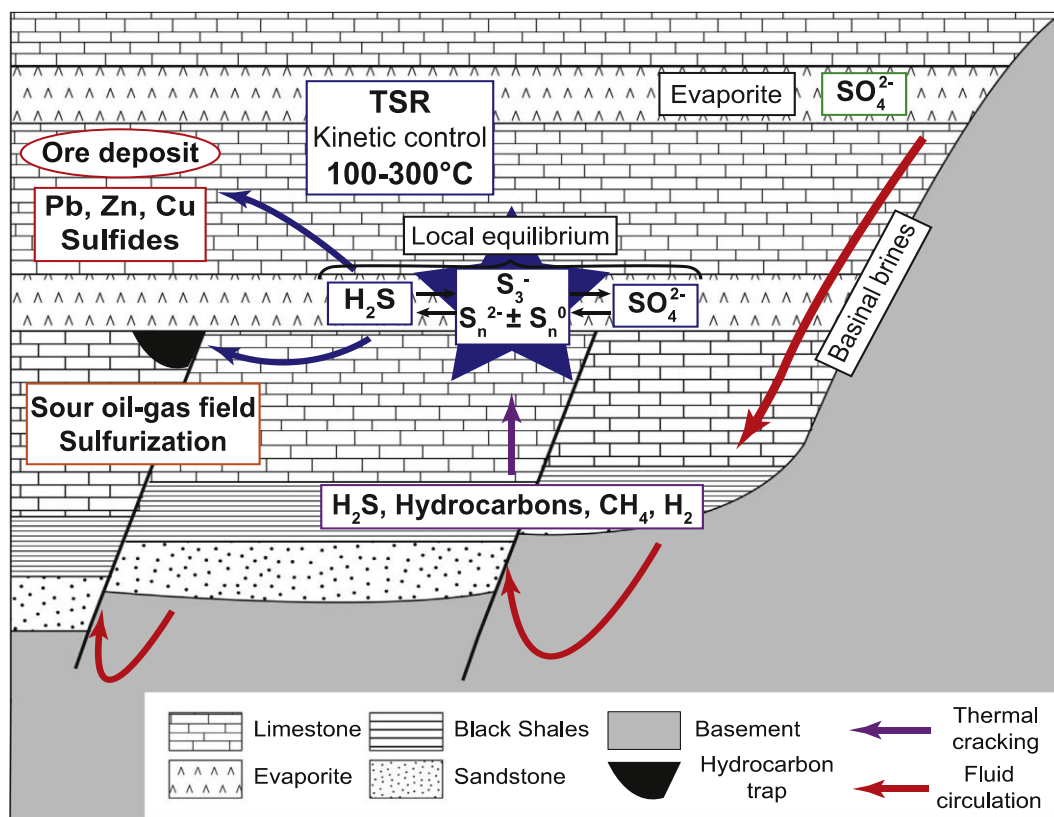


Figure 1. Exemple de synergie entre cycle du soufre, géochimie du soufre, circulation de saumures, réactions redox en présence d'hydrocarbures et formation des grands gisements de métaux de bases dans les bassins sédimentaires (d'après Barré et al., 2017)

Références:

Barré, G. et al. (2017) Chem. Geol., 462, 1-14.

First depositional stage of wolframite at W-Sn-Cu Panasqueira mine (Portugal): fluids indirect characterization through early tourmaline studied

Eleonora Carocci^{1*}, Christian Marignac¹, Michel Cathelineau¹, Marie-Christine Boiron¹, Chantal Peiffert¹, and Filipe Pinto²

¹ Université de Lorraine, CNRS, CREGU, GeoRessources, Labex Ressources 21, Vandoeuvre les Nancy – 54500, France

² Beralt- Tin and Wolfram, S.A. Barroca Grande - Portugal

*eleonora.carocci@univ-lorraine.fr

The world class W–Sn–Cu Panasqueira (CIZ) deposit consists of sub-horizontal mineralized veins of Qtz–Wfm–Cst–Ms–Toz–sulfurs. The principal W deposition is preceded by a tourmalinization event spread all around the contact with the mineralizing veins. Tourmaline crystals (50–150 μm , $\leq 500 \mu\text{m}$) follow the protolith schistosity and are systematically zoned, with a core (Tur0) and two concentric rims (Tur1a and Tur1b), pre- and syn- early quartz crack-seals, respectively. Tourmaline, coeval with W-rutile, is contemporaneous of the early wolframite onset. This starting event, preceding the main W deposition, has been dated (U/Pb, Rt) at 305.2 ± 5.7 Ma. The tourmaline crystal compositions cover a range between Fe-dravite and schorlite with same foitite and oxy-foitite components. From Tur0 to Tur1b, F apfu and Fe# increase constantly ($F \leq 1\%$). Trace elements contents (ppm) have been measured by LA-ICP-MS: Ti (≤ 2500), Zn (≤ 931), Mn (≤ 606), Li (≤ 685), V (≤ 472), Cr (≤ 624), Sr (≤ 825), Sn (≤ 92.1), Sc (≤ 92.1), Be (≤ 21.2), Pb (≤ 18.7), Ni (≤ 56.1), Co (≤ 14.3), Y (≤ 20), W (≤ 60), Nb (≤ 52) and Ta (≤ 6). Quantitative comparison between Tur1a and Tur1b compositions has shown that two fluids are involved during the tourmalinization: L1, already present in the system from the beginning, characterized by traces such as Co–Cu–Pb–Sc–Sr–V–Cr–W–Nb–Ta; and L2, injected later and continually mixed with L1, defined by Li–Zn–Mn–Fe and F. W depletion in Tur1b may be the result of the concurrency during W–Rt and early Wfm deposition. Results of this comparison are: i) the metamorphic origin of L1, confirmed also by tourmaline REEs spectra, and ii) the suspicious connection with a granitic source for L2, as far rare metals (W, Sn, Nb, and Ta) are transported by L1. Moreover, the combined results of the detailed analyses of both tourmaline and rutile crystals, have shown a clear opposite behavior between W and Nb, Ta, Sn which enforces a L2 multi-sources origin.

During the tourmalinization event, the hydrothermal system is open (as contrary recently claimed by Codeço et al., 2017 and Lecumberri-Sanchez et al., 2017) and all the elements required for the Wfm deposition are transported by different fluids: Fe and Mn clearly by L2, for instance. However, it remains to find out the reasons for W precipitation, which are not due to the fluid-rock interaction (Lecumberri-Sanchez et al., 2017).

Lecumberri-Sanchez et al (2017) Geol 45, 579-582

Codeço et al (2017) Chem Geol, 468, 1-16

Signatures géochimiques des micas et minéraux accessoires de pegmatites à métaux rares de Mangodara (Burkina Faso)

Wiledio Marc-Emile Bonzi^{1,2}, Kafohe Abdoul-Azise Hema³, Marieke Van Lichtervelde², Anne-Sylvie André-Mayer⁴, Stefano Salvi², Olivier Vanderhaeghe², Urbain Wenmenga¹

¹ Département des Sciences de la Terre, Université Ouaga I Pr Joseph Ki-Zerbo, Ouagadougou, Burkina Faso

² Géosciences Environnement Toulouse, GET, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, Observatoire Midi-Pyrénées, CNRS-IRD, Toulouse, Burkina Faso

³ Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina, Ouagadougou, Burkina Faso

⁴ GeoRessources, Université de Lorraine-CNRS-CREGU, Vandœuvre-lès-Nancy, France

* auteur pour la correspondance : wiledio.bonzi@hotmail.com

Le secteur de Mangodara (Sud-Ouest du Burkina Faso) est l'une des occurrences connues d'indices à métaux rares liées à des pegmatites dans le domaine paléoprotérozoïque du Craton Ouest Africain. Sa géologie est composée d'orthogneiss granodioritiques intrudés par des plutons granitiques et monzogranitiques, dont un leucogranite à biotite et magnétite. Le champ de pegmatites traverse aussi bien le massif leucogranitique (type I, à biotite, magnétite, et accessoirement épidote et allanite) que les faciès encaissants (type II, à biotite, muscovite, grenat, et accessoirement apatite, tourmaline, zircon, colombo-tantalite, et minéraux métamictisés porteurs d'U-Th-Zr). Ces différentes lithologies sont localement migmatitiques (foliation synmigmatitique plissée marquée par des niveaux de leucosomes alternant avec des niveaux à mica-grenat-staurotide). En vue d'établir la source de ces pegmatites, des analyses de composition en éléments majeurs et traces ont été réalisées à la Microsonde Electronique, et à l'Ablation Laser Couplée ICP-MS sur des minéraux accessoires de ces pegmatites.

Les micas des pegmatites de Mangodara sont des porteurs de Li (jusqu'à 2200 ppm dans la biotite métasomatisée d'une enclave dans la pegmatite), et de concentrations élevées en Nb (jusqu'à 438 ppm dans la muscovite) et Ta. Les apatites présentent un enrichissement en ETR lourdes (jusqu'à 920 ppm), et des variations dans les spectres d'ETR légères normalisés aux chondrites (pentes positives vs pente faiblement négative), qui pourraient refléter les conditions de différenciation ou de compétition avec d'autres minéraux porteurs d'ETR. Les grenats sont dans la solution spessartine – almandin, et contiennent jusqu'à 200 ppm de Nb et 3500 ppm d'Y. Les colombo-tantalites ont des compositions qui varient entre la ferrocolombite (composition dominante), la manganocolombite et la ferrotantalite. Leurs signatures en éléments traces correspondent à celles des pegmatites de nature NYF ou mixte NYF+LCT. Les zircons possèdent une forte concentration en ETR lourdes (facteur 2 à 4 comparé aux chondrites). Ces signatures révèlent une affinité géochimique de ces pegmatites avec l'élément Nb préférentiellement au Ta, ainsi que les éléments Zr, U, Th et ETR.

Les travaux ultérieurs devraient permettre de discriminer la nature de ces pegmatites entre le type NYF et le type mixte NYF+LCT, et de préciser l'origine de ces pegmatites entre la différenciation magmatique du pluton leucogranitique et une éventuelle contribution anatectique des faciès encaissants.

Critical metals in Pb-Zn ores: Unravelling tectono-metamorphic processes generating Ge mineralization in the Variscan Pyrenean Axial Zone

A. CUGERONE¹, B. CENKI-TOK¹, E. OLIOT¹, A. CHAUVET¹, K. KOUZMANOV³, S. SALVI², D. BEZIAT², E. LE GOFF⁴, M. MUNOZ¹,

¹ Geosciences Montpellier, Université Montpellier, France

² Geosciences Environnement Toulouse, Toulouse, France

³ Department of Earth sciences, University of Geneva, Switzerland

⁴ BRGM, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Montpellier, France

Germanium (Ge) defined as critical by the European Union is extensively used in the optical fiber and photovoltaic industries.

Presence of Ge-minerals (oxides or silicates with up to 70% wt Ge) hosted in recrystallized Ge-poor sphalerite (< 200 ppm Ge) from Pb-Zn ores is a common feature for the Variscan Pyrenean Axial Zone (PAZ). This mode of occurrence is unusual as Ge generally does not form specific minerals but occurs in high-level trace amounts in poorly deformed sphalerite (< 3200 ppm Ge) and in coal (<5500 ppm Ge). In this study, we decipher the macro- and micro-scale processes leading to concentration of Ge in Ge-minerals during major tectono-metamorphic events in the Pyrenees.

Based on a detailed structural study (from regional scale down to microscale) performed in fifteen deposits of the PAZ, we recognize two Pb-Zn-Ge mineralization events related to specific metamorphic conditions during the Variscan orogeny and propose a novel model for the genesis of the Pyrenean Pb-Zn-Ge Pyrenean mineralizations.

In order to unravel microstructural relationships, EBSD (electron backscatter diffraction), coupled with automated mineralogy using QEMSCAN analysis, is used to study sphalerite deformation processes and locate Ge-minerals. Distinct modes of recrystallization of sphalerite can be observed. Ge-minerals are preferentially localized in recrystallized domains. In situ chemical analyses (EMPA/LA-ICP-MS) indicate that, under greenschist facies conditions, recrystallization of primary enriched sphalerite promotes strong Ge partitioning into Ge-minerals, leaving behind a Ge-depleted sphalerite.

Nouvelles données sur les minéralisations en U, Pb et Zn dans le bassin de McArthur (Australie)

Joséphine Gigon^{1*}, Antonin Richard¹, Julien Mercadier¹, Irvine R. Annesley¹, Roger G. Skirrow², Andrew S. Wygralak³, Mark A. Kendrick⁴

¹ GeoRessources, Université de Lorraine, CNRS, CREGU, Boulevard des Aiguillettes, BP 70239, F-54506 Vandoeuvre-lès-Nancy, France

² Geoscience Australia, GPO Box 378, Canberra, ACT 2601, Australie

³ Northern Territory Geological Survey, GPO Box 2901, Darwin, NT 0801, Australie

⁴ Australian National University, 142 Mills Road, Acton, Australian Capital Territory 2601, Australia

* auteur pour la correspondance : josephine.gigon@univ-lorraine.fr

Le bassin de McArthur (Australie) referme des gisements de classe mondiale pour différents métaux qui totalisent 80 Mt Zn, 40 Mt Pb et 300 000 t U (Huston et al., 2006; Leach et al., 2010). Dans le bassin de McArthur, les minéralisations ne sont pas réparties de manière homogène, avec l'uranium dans ou à proximité du socle au nord et au sud du bassin, et le plomb et le zinc au centre du bassin dans des niveaux stratigraphiques plus récents. Cependant, les datations et observations montrent un premier épisode minéralisateur vers 1,7Ga qui n'est enregistré que dans les gisements d'uranium du nord, suivi d'un deuxième épisode généralisé à l'ensemble du bassin vers 1650-1600Ma (Page et Sweet, 1998; Polito et al., 2005; Skirrow et al., 2016). Afin de caractériser ces épisodes minéralisateurs, différentes approches complémentaires sont privilégiées. Les données d'inclusions fluides montrent un mélange entre des fluides peu salés et des saumures (Derome et al., 2007; Mernagh et Wygralak, 2011; Polito et al., 2004; Polito et al., 2006). Les résultats préliminaires sur les halogènes indiquent que les saumures proviennent de l'évaporation de l'eau de mer. Dans le gisement d'HYC, un mélange entre deux fluides transportant chacun du plomb avec des rapports isotopiques différents a pu être mis en évidence. Enfin, de nouvelles datations sur des minéraux associées à la diagénèse (apatites) ou à la minéralisation uranifère (uraninites) dans le secteur de Westmoreland au sud du bassin montrent la présence de différents épisodes dont certains sont assez récents (jusqu'à environ 320 Ma). Les spectres des terres rares sur uraninites (plus ou moins enrichis en terres rares légères, très différents des spectres en cloche des gisements de type discordance au nord du bassin) confirment les épisodes successifs.

References:

- Derome, D. et al. (2007) *Chemical Geology* 237, 240-254
Huston, D. L. et al. (2006) *Ore Geology Reviews* 76, 168-210
Leach, D. L. et al., (2010) *Economic Geology* 105, 593-625
Mernagh, T. P. et Wygralak, A. S. (2011) *Russian Geology and Geophysics* 52, 1421-1435
Page, R. W. et Sweet, I. P. (1998) *Australian Journal of Earth Sciences* 45, 219-232
Polito, P. A. et al. (2004) *Economic Geology* 99, 113-139
Polito, P. A. et al. (2005) *Economic Geology* 100, 1243-1260
Polito, P. A. et al. (2006) *Economic Geology* 101, 1251-1273
Skirrow, R. G. et al. (2016) *Ore Geology Reviews* 76, 463-503

Remobilization of the primary metallic concentration at the Hadal Awatib East Au-Cu ($\pm$ Zn-Ag) VMS deposit, Red Sea Hills, NE Sudan

Julien Perret^{1,2*}, Anne-Sylvie André-Mayer¹, Julien Feneyrol², Laurent Ciancaleoni², Remi Bosc², Chantal Peiffert¹, C. Tucker Barrie³

¹ GeoRessources, Université de Lorraine-CNRS-CREGU, rue Jacques Callot BP 70239, Vandoeuvre-lès-Nancy, 54506, France

² Arethuse Geology SARL, 1060 rue René Descartes – Latitude Arbois, Aix-en-Provence, 13290, France

³ CTBA Geoconsulting, 2184 Braeside Avenue, Ottawa, ON, K1H 7J5, Canada

* julien.perret@univ-lorraine.fr

Auriferous volcanogenic massive sulphide (VMS) deposits have been explored and mined since 1991 in the Ariab mining district (Red Sea Hills, NE Sudan) (Barrie et al. 2016). This district is located in the 850-550 Ma Arabian-Nubian Shield (ANS), within the East African orogeny (EAO). This metallogenic province hosts several type of deposits (VMS, orogenic gold, porphyry-type; e.g. Barrie et al. 2016, Johnson et al. 2017) and underwent numerous deformation stages that have affected the geometry and the metal concentration of the orebodies.

Different generations of pyrite (Py), sphalerite (Sp) and chalcopyrite (Ccp) have been microstructurally and texturally recognized at the Hadal Awatib East Cu-Au ($\pm$ Zn-Ag) VMS deposit. Besides, D₀ primary sulphide stage (Py₀, Sp₀, Ccp₀) related to VMS formation (ca. 890 Ma) and subsequent sulphide generations have been correlated to the regional tectonic deformation events, from ca. 770-650 Ma syn-orogenic D_{1/2} event (Py_{1/2a}, Py_{1/2b}, Sp_{1/2b}, Ccp_{1/2b}) to ca. 640-650 Ma late orogenic D₃ event (Py₃, Sp₃, Ccp₃).

Microtextural features of quartz and sulphide minerals provided new insights on the evolution of *P-T* conditions through the Hadal Awatib East deformation history. Prograde D_{1/2} deformation stage is coeval with a temperature increase from 300-400°C to peak metamorphism temperature > 400°C related to contact metamorphism. This deformation stage is associated with syn-tectonic mechanical ore remobilization expressed by the change from brittle to ductile fashion of Py and the ductile behavior of Ccp and Sp. Then, retrograde D₃ deformation stage is associated to a decrease in temperature back to 300-400°C and a massive Ccp hydrothermal-assisted deposition event. Furthermore, although the polyphased Hadal Awatib East ore reworking is highlighted by several sulphide generations, the ore-bearing sulphide trace element pattern illustrates the typical primary chemical zonation of VMS deposit from Sb, Sn, In, As-enriched (Sp-rich) massive sulphide lens to Se, Bi, Co-enriched (Ccp-rich) stringer zone. This suggests that younger mineralization was remobilized from pre-existing mineralization with no new metal income during successive syn-tectonic, mechanical and late tectonic, hydrothermal reworking of the orebodies.

References:

Barrie, C.T. et al. (2016) in Bouabdellah, M. and Slack, JF (eds) Mineral Deposits of North Africa 417-435
Johnson, P.R. et al. (2017) S. Afr. J. Geol. 120:63-76

Deformation stages versus gold events at the Yaou polyphased gold deposit, French Guiana: constraints from veins, pyrite, alteration and microtectonic studies

Vincent Combes^{1, 2, *}, Anne-Sylvie Andre-Mayer¹, and Aurélien Eglinger¹

¹GeoRessources (Université de Lorraine, CNRS UMR7359-CREGU) France

²Auplata SA, (CS50750, 97337 Cayenne cedex) France

* vincentcombes25@gmail.com

The Guiana shield located in South America has numerous gold mineralizations in spatial and temporal relationship with the Transamazonian orogeny (2250-1950 Ma). These gold deposits are associated with greenstone belts along large shear zones. The Yaou gold deposit explored by the mining company Auplata is a rheologically controlled mineralized system associated with quartz-carbonate veins located mainly in intrusive bodies aligned in a 4.5 km structure striking N60° along a shear zone. Gold is itself carried by pyrite as free inclusion and solid solution in the lattice. The observed deformation stages show a progressive evolution from the ductile regime to the brittle one. Phases D1 and D2 are well marked in the host lithologies. The veins associated with D1 and D2 are boudinaged and folded. A post D2 plutonic episode forms dykes and plutons of intermediate composition that are locally mylonitized by the D3 deformation. The intrusion and the mylonitisation could be synchronous. This D3 shear is mostly recorded in a felsic schist unit having a metasedimentary protolith. A S3 foliation is observed together with a mylonitic gradient and millimeter scale pyrites with quartz-chlorite-calcite pressure fringes (porphyroclasts pre to syn D3). A fragile deformation event gives D4 quartz-carbonate veins mostly in the intrusion, and more rarely cross-cutting the shear zone. A late brecciation D5 affects the intrusive unit. These monogenic cataclastites are cross-cutting the D4 veins. Two lithologies host the mineralized D4 veins; a fine grained dioritic intrusive composed of hydrothermal albite, ankerite, minor quartz, sericite and pyrite, as well as a felsic mylonitized metasedimentary unit made of quartz, chlorite and sericite. The precise role of these two units is still debated, a chemical trap or a physical-rheological control. The surrounding area is characterized by mafic and ultramafic schist. By adding the observations of cores and the petrography data, it is possible to discriminate generations of vein and pyrite associated with these deformation stages. Three generations of pyrites are defined. Results of *in situ* analyses using LA-ICP-MS on pyrite show at least two gold events associated with D3 and D4 confirming the polyphased nature of the deposit. Pyrite Py 3 exhibits an Au-As correlation with a cobalt and arsenic rhythmic zonation. The core is interpreted as detrital and diagenetic pyrite Py 0. Gold in pyrite Py 4 is found as solid solution (0.5- 1.5 ppm) and as inclusions in association with elements such as Te, Ag and Bi.

Comportement des métaux dans les magmas d'arrière arc : nouvelles contraintes apportées par la zone Futuna

Aurélien Jeanvoine^{1,2,*}, Gilles Chazot², Ewan Pelleter¹, Yves Fouquet¹, Bleuenn Guéguen², Jessica Langlade²

¹IFREMER, 1625 Route de Sainte-Anne, Plouzané, 29280, France

²IUEM, rue Dumont d'Urville, Plouzané, 29280, France

* aurelien.jeanvoine@ifremer.fr

Alors que le lien existant entre les minéralisations enrichies en métaux de base (e.g. : zinc, cuivre) et en métaux rares (e.g. : or, argent) et les magmas générés en contexte de supra-subduction est établi depuis longtemps, les processus qui gouvernent leur mise en place restent encore mal compris. Les magmas d'arc dont le manteau subit l'influence des fluides issus du panneau plongeant sont généralement plus oxydés et plus riches en éléments volatiles que leurs équivalents des rides médio-océaniques. Or, le comportement de ces métaux est intimement lié à celui du soufre, qui atteint sa limite de saturation plus tardivement dans les magmas oxydés. Les métaux ainsi concentrés dans les magmas d'arcs peuvent être transférés jusqu'aux minéralisations sulfurées sur le plancher océanique soit (1) directement via l'exsolution d'une phase aqueuse magmatique (fluides magmatiques) qui se mélange au fluide hydrothermal issu de l'eau de mer soit (2) indirectement via la remobilisation par le fluide hydrothermal des sulfures magmatiques contenus dans les roches volcaniques.

En 2011, de nombreux dépôts de sulfures de zinc et de cuivre souvent enrichis en or et en argent ont été découverts dans la ZEE française de Wallis et Futuna, à la terminaison Nord-Ouest du bassin d'arrière arc de Lau. Les roches magmatiques associées appartiennent à une série de différenciation subalcaline incluant des basaltes stricto sensu, des andésites basaltiques, des andésites, des trachy-andésites et des dacites (MgO = 0.4 - 12 wt. %). Une première étude de ces magmas a mis en évidence que le manteau source n'était pas significativement modifié par les fluides issus du panneau plongeant à la fosse des Tonga-Kermadec (Labanieh et al., 2011). Un modèle autre que celui impliquant un contexte plus oxydant lié à l'influence des fluides de subduction doit être envisagé pour expliquer les enrichissements en métaux des minéralisations de Wallis et Futuna. Cette étude comprend l'analyse in-situ en éléments majeurs et traces de 29 verres magmatiques acquise à partir du couple microsonde électronique/LA-ICP-MS. Les résultats sont comparés à ceux obtenus sur le centre d'accrétion Nord-Est Lau (Park et al., 2015) dont le manteau, à l'inverse de la zone Futuna, subit l'influence des fluides de subduction. Ces travaux permettent d'apporter de nouvelles contraintes sur les processus magmatiques gouvernant le comportement des métaux avant qu'ils n'entrent dans le système de convection hydrothermale.

References:

Labanieh, S. et al. (2011), Goldschmidt Conference

Système métallogénique d'une transition Océan-Continent : analogie avec les systèmes actuels, Marmorera/Cotschen, nappe de Platta, Alpes Suisses.

R. Coltat^{1*}, P. Boulvais¹, Y. Branquet^{1, 2}, E. Pelleter³

1 Géosciences Rennes, CNRS-UMR 6118, Université de Rennes 1, Rennes, 35042, France

2 Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, UMR 7327, Université d'Orléans, Orléans, 45234, France

3 IFREMER Centre de Brest, DRO/GM, Plouzané, 29280, France

* Rémi Coltat : remi.coltat@univ-rennes1.fr

Les transitions océan-continent (OCT) sont étudiées depuis des décennies pour leurs ressources naturelles en hydrocarbures via des études de sismique réflexion, modélisation numérique ou encore par des comparaisons avec des analogues à terre. Une importante découverte a été la reconnaissance de roches mantelliques exhumées par des détachements dans les parties les plus distales de certaines marges. Ces structures ressemblent à celles imagées le long des rides océaniques au niveau des Oceanic Core Complex. Elles focalisent des circulations de fluides réagissant avec de larges volumes de roches mafiques (systèmes hydrothermaux) et ultramafiques (serpentinisation, ophicalcitisation) et aboutissent notamment à des minéralisations spécifiques (sites de Rainbow, Lost-City, Ashadze sur la dorsale atlantique).

Dans ce travail, nous présentons un système métallogénique associé à l'ouverture Jurassique de l'océan Liguro-Piemontais, Alpes Suisses. Le système préservé dans la marge hyper-étendue de la nappe de Platta, affleure de manière remarquable et sa structure générale a échappé à la déformation alpine postérieure. La minéralisation à Fe-Cu-Zn est encaissée dans un substrat serpentineux dans le mur du détachement qui met au contact des serpentinites avec des basaltes. Un lien spatial et génétique est établi entre les filons intrusifs qui recoupent les serpentinites et la mise en place des minéralisations immédiatement au contact. La minéralisation présente une zonation de la base, avec un enrichissement en oxydes de fer (magnétite), au sommet avec un enrichissement en sulfures de cuivre (chalcopryrite, bornite, covellite). La minéralisation massive s'accompagne latéralement d'une altération siliceuse. L'assemblage minéralogique et la séquence d'altération liée à la circulation des fluides hydrothermaux présentent des analogies fortes avec les systèmes hydrothermaux océaniques actuels comme celui de Rainbow, Dorsale medio-Atlantique.

Références :

Dietrich, V. (1972) Geotechnische Serie, v. 49, 129p

Marques, A.F.A. et al. (2006) Miner. Deposita (2006) 41 : 52-67

McCaig, A.M. et al. (2007) Geology, v. 35, p. 935-938

McLeod, C.J. et al. (2002) Geology, v. 30, p. 879-882

Caractérisation des brannérites (UTi₂O₆) : étude texturale, géochimique et cristallographique de l'altération naturelle : Implications pour la compréhension des processus de remobilisation de l'U et pour l'optimisation des procédés de lixiviation

Turuani Marion

Université de Franche Comté

Actuellement, l'uranium est essentiellement exploité à partir de minerais d'uraninite (UO₂). L'épuisement programmé de cette ressource requière l'exploitation de nouvelles phases minérales non conventionnelles. La brannérite, de formule idéale UTi₂O₆, souvent reportée (U, Ca, Th, REE, Y)(Ti, Al, Fe, Si)₂O₆₋₈(OH)_x représente un potentiel minerais d'U, alternatif à l'uraninite. Les conditions de formation de cette phase étant mal connues, une étude comparative de 14 échantillons naturels provenant de différents contextes géologiques (hydrothermal, métamorphique et magmatique) a été réalisée. L'analyse microscopique a révélé une importante variété de texture (zonation concentrique, inclusions, stockwerk, couronnes d'altération). Les analyses des éléments majeurs, mineurs, traces et des compositions isotopiques ont permis de mettre en évidence 1) des substitutions, qui peuvent être indicatrices des conditions de formation à l'échelle du gisement, 2) des spectres de Terres Rares marquant des signatures spécifiques pour chaque contexte de formation et 3) une homogénéité isotopique permettant l'utilisation de la brannérite comme géochronomètre. Certaines substitutions nécessitent une compensation de charge (e.g. Ca²⁺) ce qui implique différentes spéciations de l'uranium au sein de ce minéral. Peu d'échantillons montrent une stœchiométrie proche du pôle théorique. Les occurrences hydrothermales et métamorphiques présentent des zones très altérées, avec la cristallisation de phases secondaires (e.g. coffinite USiO₄) témoignant d'interactions fluide-minéral. Le caractère radioactif de l'uranium pose la question de l'effet de la métamictisation et du temps sur la mobilité des éléments et la conservation de la chimie primaire. Une étude cristallographique par spectroscopie μ Raman a mis en évidence le caractère totalement amorphe des plus jeunes cristaux (4,8Ma) mais également la formation de nanostructures d'anatase (TiO₂) au sein du réseau cristallin dans les échantillons les plus vieux (530 Ma). Ces résultats, couplés à des observations au MET qui montrent des exolutions d'uraninite et de galène dans les échantillons les plus âgés, semblent indiquer une relative mobilité des éléments au cours du temps. Les résultats obtenus durant cette étude permettent de discuter de plusieurs implications en terme 1) de signature et de connaissance des gisements d'U, 2) d'utilisation de la brannérite en tant que géochronomètre et 3) d'optimisation des procédés d'extraction d'U.

Impact du Soufre sur les transferts des métaux critiques par les fluides géologiques

Clément Laskar, Gleb S. Pokrovski

Groupe Métallogénie Expérimentale, Géosciences Environnement Toulouse (GET), Observatoire Midi-Pyrénées, Université de Toulouse, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Institut de Recherche pour le Développement (IRD), F-31400 Toulouse, France

La compréhension de la mobilité des métaux critiques (Mo, Re, platinoïdes) en profondeur est un enjeu important afin de pouvoir mieux connaître à la fois la formation de leur gisement, mais aussi leur mobilité en profondeur, ce qui peut avoir un impact sur leur utilisation en tant que traceur isotopique par exemple. Ces métaux sont dits critiques car ils présentent un enjeu économique fort en raison de leur importante utilisation industrielle pour la catalyse automobile ou bien dans les piles à combustible dans le cas du platine par exemple, alors que leurs gisements disponibles à l'exploitation sont rares. Or la mobilité de ces métaux est fortement dépendante de la nature chimique des fluides en profondeurs. Dans notre cas la présence du soufre a un impact important, car ces métaux possédant une forte affinité pour ce dernier, la formation de complexes avec des ligands soufrés en solution est donc favorisée. Cela va permettre d'augmenter leur solubilité et donc leur mobilité au sein du fluide profond. Le soufre possède deux principaux états d'oxydation dans la croûte superficielle sous forme de sulfure et de sulfate. Néanmoins une autre forme stable du soufre du type ions radicalaire de formule S_3^- a pu être observé par spectroscopie Raman in situ dans des conditions de haute température et de haute pression (au-dessus de 250°C et 0,5 GPa) : il pourrait donc avoir une nouvelle influence sur la complexation de ces métaux et sur leur solubilité.

Le projet de thèse va ainsi pouvoir s'articuler en 3 principaux axes de recherches :

- Acquérir de nouvelles données expérimentales sur la solubilité et la spéciation de ces métaux dans les fluides riches en soufre et notamment en présence des ions radicalaires.
- Établir, en utilisant les données obtenues et celles disponibles dans la littérature, des modèles prédictifs de la stabilité des complexes des métaux (paramètres thermodynamiques) et la solubilité de leurs principaux minéraux dans les fluides hydrothermaux.
- Confronter ces résultats avec des données naturelles (inclusions fluides; compositions minérales des gisements porphyres Cu-Au-Mo et magmatiques Ni-Cu-PGE; ophiolites) afin d'améliorer les modèles de transport, concentration et fractionnement de ces métaux.

References:

Pokrovski, G. et Dubrovinsky L., (2011) Science volume 331
Pokrovski, G. et Dubessy, J. (2015) Earth and Planetary Science Letter volume 411
Jacquemet et al. (2014), American Mineralogist volume 99

Introduction à la métallurgie extractive pour le traitement des minerais et des résidus

Alexandre Chagnes

¹GeoRessources (Université de Lorraine, CNRS UMR7359-CREGU) France
alexandre.chagnes@georessources-univ-lorraine.fr

L'approvisionnement durable des ressources minérales non énergétiques est un des enjeux du 21^{ème} siècle avec le développement de la transition énergétique. Afin d'assurer cet approvisionnement, nous devons exploiter des ressources de plus en plus complexes, c'est-à-dire de plus en plus pauvres et polymétalliques, issues des ressources primaires, et de plus en plus des ressources secondaires. Nous devons être de plus en plus ingénieux pour que les procédés de la métallurgie extractive soient performants et économiquement viables tout en respectant l'environnement. Ces procédés reposent sur une combinaison d'opérations unitaires consistant à préparer le minerai ou le déchet par des étapes de broyage, de concassage et de tamisage, à produire un concentrat par des méthodes de séparation physique, à réaliser des traitements à haute température (pyrométallurgie), à extraire chimiquement les éléments d'intérêt par des méthodes spécifiques comme la lixiviation, l'extraction liquide-liquide ou encore les résines échangeuses d'ions. Cette introduction à la métallurgie extractive a pour ambition d'apporter les fondamentaux nécessaires à la compréhension des cas industriels qui seront abordés par la suite.

Application de la métallurgie extractive au recyclage

E. Meux^{1*}, N. Leclerc¹, S. Legeai¹, C. Hazotte², J. Comel¹, F. Lapicque², E. Billy³

¹ Groupe Chimie et Electrochimie des Matériaux, Institut Jean Lamour, CNRS- Université de Lorraine, 1 Boulevard Arago, 57078 Metz Cedex 3, France

² Laboratoire Réactions et Génie des Procédés-CNRS-Université de Lorraine ENSIC - 1 rue Grandville, 54001 Nancy, France

³ Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies nouvelles et les Nanomatériaux, Université de Grenoble-Alpes - CEA, 38054 Grenoble, France

* eric.meux@univ-lorraine.fr

De nombreux coproduits de la métallurgie (poussières, boues, scories), matériaux en fin de vie (catalyseurs de l'industrie chimie et pétrochimique) ou encore biens de consommation usagés (piles, batteries, D3E) contiennent des métaux et peuvent être qualifiés à ce titre de Matières Premières Secondaires (MPS). Certains de ces déchets contiennent en effet des concentrations en métaux très souvent supérieures à celles que l'on trouve dans les minerais classiquement utilisés. Les différentes opérations de la métallurgie extractive sont donc applicables à ces MPS, qui peuvent subir ou pas des traitements physiques permettant leur démantèlement. Le traitement hydrométallurgique de ces MPS est schématisé sur la Figure 1.

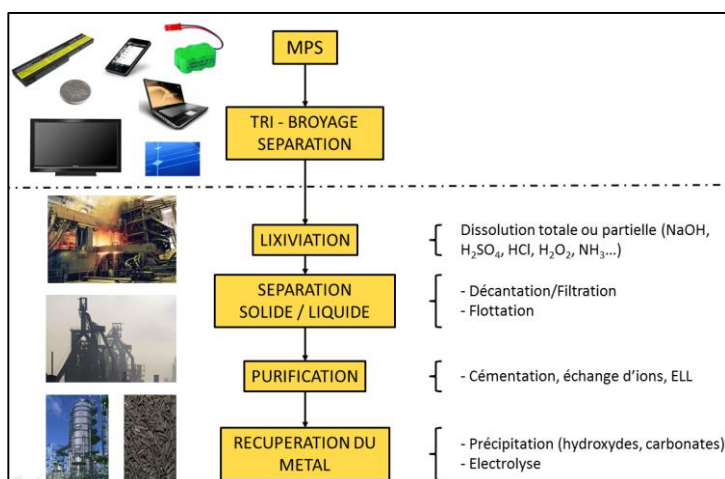


Figure 1. Traitement hydrométallurgique des Matières Premières Secondaires

Plusieurs exemples seront abordés au cours de cet exposé :

- Le recyclage des piles Zn/MnO₂, des accumulateurs NiCd et la valorisation des catalyseurs d'hydrotraitement utilisés pour le raffinage des hydrocarbures qui font appel à des opérations hydrométallurgiques traditionnelles
- Les possibilités de traitement offertes par le couplage électrolixiviation/électrodéposition développée au laboratoire depuis une dizaine d'années.

Références:

Ruiz, V. *et al.* Ind. Eng. Chem. Res. (2011), 50 (9), 5295-5306.

Ruiz, V. *et al.* Ind. Eng. Chem. Res. (2011), 50 (9), 5307-5315.

Hazotte, C. *et al.* Hydrometallurgy. (2016), 162, 94-103.

Balva, M. *et al.* ChemSusChem. (2017), 10 (14), 2922-2935.

Comparaison des différentes voies de traitement des minerais oxydés de nickel

Vincent Pomarède^{1*}, Yves Le Quesne¹,

¹ ERAMET Research, 1 avenue Albert Einstein, Trappes, 78193, France

* vincent.pomarede@erametgroup.com

Les gisements primaires de nickel oxydés sont constitués de différentes minéralisations successives issues de l'altération de la péridotite initiale. Le haut des gisements est formé de limonite à base d'hydroxyde de fer, alors que le bas du gisement contient des saprolites, silicates de magnésium hydratés. Le nickel est disséminé dans les matrices limonitiques et saprolitiques.

Afin de pouvoir valoriser au mieux la totalité des gisements, différents procédés de métallurgie extractive ont été développés pour s'adapter à la chimie des minerais, à leur teneur en nickel et au ratio limonite/saprolite. Ce sont principalement des procédés pyrométallurgiques de fusion-réduction à haute température ou des procédés hydrométallurgiques de lixiviation en milieu sulfurique.

Le choix entre le type de procédé à appliquer est non seulement conduit par la chimie des minerais, mais également par les impacts environnementaux, par la qualité des résidus produits, par les consommations d'énergie et de réactifs, et par la complexité des technologies associées au procédé. La valorisation de co-produits tels que le cobalt ou le scandium est également étudiée.

En conclusion, chaque gisement latéritique de nickel doit faire l'objet d'études approfondies techniques et économiques pour trouver le procédé le mieux adapté à sa valorisation la plus complète.

Procédés physiques de séparation des mélanges granulaires ou pulvérulents

Lucien Dascalescu, Thami Zeghloul

Institut PPRIME, UPR 3346 CNRS – Université de Poitiers – ENSMA,
IUT d'Angoulême, 4 avenue de Varsovie, 16000 Angoulême

Le recyclage des produits métalliques provenant des déchets industriels représente depuis plusieurs années une étape importante dans le cycle géochimique des métaux, car il permet d'accroître la disponibilité de nombreuses matières premières fortement utilisées dans l'industrie. Ce processus comporte plusieurs opérations, qui seront brièvement présentées dans cet exposé. Le démantèlement et le tri manuel, le broyage, suivi parfois par la micronisation, sont les premières opérations pour aboutir à une dissociation mécanique des constituants des déchets [1, 2]. Elles sont complétées par une opération de séparation qui peut être magnétique, par courants de Foucault, optique, ou électrostatique [3-5]. La séparation électrostatique, qui fera l'objet d'une présentation plus détaillée, est une méthode de tri sélectif des corps électriquement chargés ou polarisés, sous l'action des forces d'un champ électrique [6]. Différents mécanismes physiques interviennent dans ce processus : l'induction électrostatique, la décharge couronne, la charge triboélectrique. C'est une technologie propre caractérisée par des coûts d'exploitation et d'entretien réduits, ainsi que et par une faible consommation d'énergie. Deux séparateurs électrostatiques récemment mis au point dans l'équipe de recherche que les auteurs dirigent au sein de l'Institut PPRIME, à l'IUT d'Angoulême (Fig. 1) ont été choisis pour illustrer les possibilités d'utilisation de cette technologie au recyclage du cuivre et de l'aluminium contenus dans des déchets d'équipements électriques et électroniques.

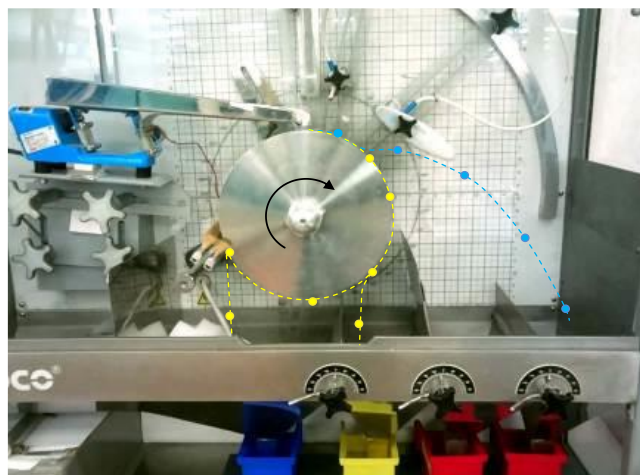


Fig. 1. Séparateur électrostatique à cylindre tournant.

Références

- [1] C. B. Gill, *Materials Beneficiation*, Springer, Berlin, 1991.
- [2] Menad, N.E. *Physical separation processes in waste electrical and electronic equipment recycling* In WEEE Recycling. Research, Development, and Policies (A. Chagnes, G. Cote, E. Ekberg, M. Nilsson, T. Retegan, Eds), Elsevier, Amsterdam, 2016, pp. 53-74
- [3] C. Jirang and E. Forssberg, *J. Hazard. Mater.* **99**, 243-263 2003.
- [4] S.M. Al-Salem, P. Lettieri, and J. Baeyens, *Waste Manag.* **29**, 2625–2643, 2009.
- [5] R. Wang and Z. Xu, *Waste Manag.* **34**, 1455-1469, 2014.
- [6] Dascalescu, L., Zeghloul, T., Iuga, A. *Electrostatic separation of metals and plastics from waste electrical and electronic equipment* In WEEE Recycling. Research, Development, and Policies (A. Chagnes, G. Cote, E. Ekberg, M. Nilsson, T. Retegan, Eds), Elsevier, Amsterdam, 2016, pp. 75-106.

Etude de la précipitation de sels de cobalt en vue de la récupération dans des lixiviats

N. Djoudi*, M. Le Page Mostefa, H. Muhr

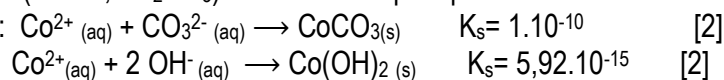
Laboratoire Réactions et Génie des Procédés (LRGP) UMR 7274 CNRS, ENSIC 1 rue Grandville BP 20451 NANCY, 54001, France

* auteur pour la correspondance : neila.djoudi@univ-lorraine.fr

Les métaux dits critiques tels que le cobalt, revêtent un caractère particulièrement stratégique car ils sont présents dans de nombreuses technologies à haute valeur ajoutée. Néanmoins, au rythme de la consommation actuelle de ces métaux et plus particulièrement le cobalt, les industriels se voient confrontés à des risques de pénurie pour leur approvisionnement. C'est pourquoi les enjeux de la recherche sur la récupération de ces métaux, à partir de déchets industriels ou urbains, sont importants pour les années à venir.

La présente étude est portée sur la récupération du Cobalt par précipitation. En raison de la composition complexe des lixiviats et de leur faible concentration en métaux ($< 1\text{g/L}$), la récupération et la séparation des métaux demeurent complexes et demandent de nouveaux développements pour leur purification. C'est pourquoi l'attention a été portée sur la précipitation qui est un procédé de séparation de premier ordre dans le domaine de l'hydrométallurgie [1].

La précipitation du Cobalt (II) est étudiée en réacteur (1L) parfaitement agité à 25°C , à partir de solutions synthétiques dont la concentration en cobalt varie de 1.10^{-2} mol/L à 1.10^{-1} mol/L . L'ajout d'agents précipitants (NaOH , Na_2CO_3) induit alors la précipitation d'un sel insoluble de cobalt selon les réactions suivantes :



Les résultats obtenus permettent de comparer l'efficacité de la précipitation du cobalt en fonction du précipitant choisi. En effet, l'hydroxyde de sodium permet de faire précipiter de manière instantanée la quasi-totalité du cobalt présent en solution, contrairement au carbonate de sodium dont la cinétique de précipitation est lente (> 72 heures). La concentration résiduelle de Cobalt (II) est plus élevée en formant $\text{CoCO}_{3(\text{s})}$ ($85,5\text{ mg/L}$ de cobalt (II) soit $0,72.10^{-3}\text{ mol/L}$) que $\text{Co(OH)}_{2(\text{s})}$ ($\sim 2.10^{-7}\text{ mol/L}$ de cobalt (II)). La granulométrie des précipités est cruciale pour les étapes de filtration et de lavage du produit final. En effet, la mise en œuvre de ces opérations est particulièrement délicate pour des particules solides de petites tailles ($< 20\mu\text{m}$). Or, les particules d'hydroxyde de cobalt sont plus petites que celles de carbonate de cobalt. En effet, elles sont de l'ordre de $0,25\mu\text{m}$ et forment des agglomérats de $10\mu\text{m}$ environ, alors que les particules de carbonate de cobalt forment des agglomérats d'environ $40\mu\text{m}$.

L'optimisation des paramètres opératoires du procédé devrait permettre un meilleur contrôle de la granulométrie du précipité et des réacteurs à forte densité de solide seront mis en œuvre. D'autres agents précipitants (sulfure, oxalate, phosphate) seront aussi envisagés.

References:

1. Andres,Y. Faur-Brasquet, C. Gerente,C, et al. Elimination des ions métalliques et des métalloïdes dans l'eau. Techniques de l'ingénieur. 2007. Réf. W8000 V1.
2. Tonneau,J. Tables de chimie. 2nd Ed. Bruxelles : De Boeck, 2004, 154

Suivi des propriétés chimiques, minéralogiques et magnétiques des laitiers d'aciérie à four électrique (LAFE) au cours de leur altération

Maud HERBELIN^{1*}, Jérôme BASCOU¹, Véronique LAVASTRE¹, Damien GUILLAUME¹, Frédéric ASTOLFI²

¹ Université de Lyon, UJM-Saint-Etienne, CNRS, UCA, IRD, LMV UMR 6524, F-42023, SAINT-ETIENNE, France

² INDUSTRIE FRANCE Groupe ArcelorMittal, B.P. 368 42803 Rive de Gier, France

* maud.herbelin@univ-st-etienne.fr

Les laitiers sidérurgiques, longtemps considérés comme déchets et stockés en décharges, font partie aujourd'hui des matériaux alternatifs largement utilisés en construction routière et en cimenterie. Depuis 2012, suite à la directive 2008/98/CE, ils ont acquis le statut de sous-produits de l'industrie sidérurgique, ce qui a facilité leur commercialisation et leur valorisation. Cependant, des volumes importants de laitiers anciens demeurent inutilisables car ils ne répondent pas aux normes environnementales actuelles. Ils sont souvent stockés sur les sites de production.

Des Laitiers d'Aciérie à Four Electrique (LAFE) ont été accumulés pendant plusieurs décennies sur le site de Châteauneuf (Loire) formant un crassier de plusieurs hectares et de plusieurs mètres d'épaisseur, leurs propriétés chimiques, en particulier leur teneur trop élevée en chrome (élément toxique sous certains degrés d'oxydation), ne permettent pas de les valoriser dans les filières habituelles (BTP, cimenterie, ballast, agriculture, filtration de l'eau). Des questions se posent sur le comportement à long terme de ces matériaux soumis à l'altération météorique.

Cette étude vise à suivre les transformations minéralogiques subies par les LAFE au cours du temps et à identifier les mécanismes de relargages de métaux en jeu. Plusieurs méthodes de caractérisation sont utilisées, à différentes échelles. De nombreux travaux ayant montré des corrélations entre les propriétés magnétiques des sols et la présence de certains métaux (Clozel-Leloup et Théveniaut, 2001 ; Jordanova et al., 2014), l'approche magnétique peut être utilisée comme outil de cartographie de la pollution. A l'aide d'un outil portable, la méthode est simple à mettre en œuvre et permet de couvrir de grandes surfaces. Des mesures de susceptibilité magnétique ont ainsi été réalisées sur le terrain afin de construire une carte magnétique du sol. En laboratoire, les mesures magnétiques couplées aux analyses chimiques ont mis en évidence des corrélations entre la susceptibilité magnétique et la présence de Fe, de Cr, et de Mn. En parallèle, une approche expérimentale a montré une mobilité importante du chrome par lessivage à l'eau. Ces expériences vont permettre de décrire les mécanismes à l'œuvre, mais les conditions expérimentales n'étant pas complètement analogues aux conditions d'exposition naturelle, des lysimètres sont en cours d'installation pour compléter l'étude.

Références:

Clozel-Leloup B., Théveniaut H. avec la collaboration de Laperche V., Jezequel P., Pedroletti V. (2001) – Utilisation du signal magnétique des sols comme outils de cartographie de terrain de pollution métallique : Test méthodologique. Rapport BRGM/RP-51425-Fr, 103 pages, 29 figures, 5 tableaux, 3 annexes.

Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 consultable sur <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008L0098>

Jordanova, D., Jordanova, N., & Petrov, P. (2014). Magnetic susceptibility of road deposited sediments at a national scale - Relation to population size and urban pollution. *Environmental Pollution*, 189, 239–251. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.02.030>

A new insight in the mechanism of carboxylate adsorption on the monazite surface

A. Geneyton^{1,2}, L. Filippov^{2*}, N. Menad²

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

² Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM), 3, Avenue Claude Guillemin, 45060, Orléans, France

* auteur pour la correspondance : lev.filippov@univ-lorraine.fr

The rare-earth semi-soluble salts minerals (monazite, bastnaesite, xenotime...) are known to be floated more efficiently in presence of hydroxamate or carboxylate collectors under slightly alkaline conditions [1–3].

There is a well-known correlation between the conditions of thermodynamic predominance of $\text{Ln}(\text{OH})_2^+$ and $\text{Ln}(\text{OH})_2^+$ species in the bulk and the optimal rare earth minerals floatability [1,4,5]. The surface lanthanide ions are largely considered as the active adsorption sites of the collector. It has emerged that the hydroxylation of these surface ions are likely to enhance the collector adsorption but the promoting mechanism is not understood [1,4–8].

Our recent research works highlight that the carboxylate collector may also adsorb on the mineral surface via a lanthanum bridging cation on the surface oxygen ions promoting the monazite floatability. These results highlight that the oleate should not be only considered as an anionic collector that adsorb on the cationic surface sites. On the contrary, we suggest that the adsorption of the collector on the mineral surface is controlled by the affinity of the media ions for the carboxylate group of the collector and the mineral surface ions.

References:

- [1] T.-W. Cheng, P.N. Holtham, T. Tran, Froth flotation of monazite and xenotime, *Miner. Eng.* 6 (1993) 341–351. doi:10.1016/0892-6875(93)90014-E.
- [2] D.W. Fuerstenau, Pradip, Mineral flotation with hydroxamate collectors, in: Rome, 1984.
- [3] A. Jordens, C. Marion, O. Kuzmina, K.E. Waters, Surface chemistry considerations in the flotation of bastnäsite, *Miner. Eng.* 66–68 (2014) 119–129. doi:10.1016/j.mineng.2014.04.013.
- [4] Pradip, D.W. Fuerstenau, The adsorption of hydroxamate on semi-soluble minerals. Part I: Adsorption on barite, Calcite and Bastnaesite, *Colloids Surf.* 8 (1983) 103–119. doi:10.1016/0166-6622(83)80079-1.
- [5] W. Zhang, R.Q. Honaker, J.G. Groppo, Flotation of monazite in the presence of calcite part I: Calcium ion effects on the adsorption of hydroxamic acid, *Miner. Eng.* 100 (2017) 40–48. doi:10.1016/j.mineng.2016.09.020.
- [6] T.-W. Cheng, A.C. Partridge, T. Tran, P.L.M. Wong, The surface properties and flotation behaviour of xenotime, *Miner. Eng.* 7 (1994) 1085–1098. doi:10.1016/0892-6875(94)90001-9.
- [7] E.R.L. Espiritu, G.R. da Silva, D. Azizi, F. Larachi, K.E. Waters, The effect of dissolved mineral species on bastnäsite, monazite and dolomite flotation using benzohydroxamate collector, *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.* 539 (2018) 319–334. doi:10.1016/j.colsurfa.2017.12.038.
- [8] E.R.L. Espiritu, S. Naseri, K.E. Waters, Surface chemistry and flotation behavior of dolomite, monazite and bastnäsite in the presence of benzohydroxamate, sodium oleate and phosphoric acid ester collectors, *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.* 546 (2018) 254–265. doi:10.1016/j.colsurfa.2018.03.030.

Processing a complex W ore by pre-concentrating with a Falcon concentrator prior to flotation

Y. Foucaud ^{1,*}, Q. Dehaine ^{1,2}, I. Filippova ¹ and L. Filippov ^{1,*}

¹ GeoRessources, Université de Lorraine, CNRS, UMR 7359, France, lev.filippov@univ-lorraine.fr, yann.foucaud@univ-lorraine.fr

² Camborne School of Mines, University of Exeter, United Kingdom

* yann.foucaud@univ-lorraine.fr; lev.filippov@univ-lorraine.fr

Flotation is the most common beneficiation route for tungsten ores, but the predominance of minerals with similar surface properties poses a real challenge. This study investigates the use of Falcon centrifugal separators for gangue minerals removal and desliming prior to flotation. A typical tungsten-bearing skarn ore (Tabuaço, Portugal) is used, containing scheelite (CaWO_4) associated with dense calcium-bearing silicates (vesuvianite), fluorite, apatite and light silicates (feldspars) as gangue minerals. Two types of Falcon bowls (Falcon UF and Falcon SB) were used, prior to flotation tests with fatty acids as collectors and a combination of sodium carbonate and sodium silicate as gangue minerals depressants. This flowsheet was compared with a reverse configuration, using flotation prior to Falcon concentrator, and with a classical flowsheet, using hydrocyclone and flotation. Gravity pre-concentration and desliming with the Falcon concentrator were optimized through the design of experiments (DoE) methodology. The influences of pulp density, rotational speed, feed flowrate and fluidisation pressure (for the Falcon SB) were studied for both bowls. Results showed that the Falcon can be used as a desliming and pre-concentrating apparatus. Separation performances depend mainly on rotary speed and pulp density for the Falcon UF, whereas rotary speed and fluidisation pressure are the main parameters for the Falcon SB. With only one stage of Falcon SB, an enrichment ratio of 7.9 is obtained with a 65% WO_3 recovery while 89% of apatite and fluorite are rejected, which constitutes a very good selectivity. In comparison, Falcon UF shows lower enrichment ratios, around 2.7. In terms of desliming, Falcon UF is as efficient as the hydrocyclone, while the Falcon SB is significantly more efficient. Hence, the use of Falcon SB prior to flotation improves the overall performance of the tungsten flotation route by desliming the flotation feed while pre-concentrating the scheelite. It impacts very advantageously the flotation, as most of the calcium-bearing minerals are eliminated. A Falcon SB stage prior to flotation yields a final concentrate grade of 33.5% WO_3 with a recovery of 64% with low amounts of penalizing elements. The Falcon SB pre-concentration also eliminates 85% of the flotation feed, allowing an energy, a water and mainly a reagents-costs saving.

Mercredi 3 Octobre 2018



*Culture d'Alyssum murale pour l'agromine du Ni (Albanie, photo G. Echevarria)
Restauration des sols des exploitation de terres rares en Chine (photo J-L Morel)*

Mercredi 3 octobre 2018

Session Eléments métalliques dans l'environnement, et impact écotoxicologique

8h30-9h10 Laetitia Minguez, LIEC : Les métaux dans les écosystèmes aquatiques : devenir et effets

9h10-9h40 Rémi Marsac, Géosciences Rennes : Spéciation, modélisation et REE

9h40-10h10 Giovanni Pagano, Université de Naples : Les terres rares: implications dans la santé environnementale et humaine

0h10-10h40 Les recherches en cours par les doctorants : Présentations courtes de 3 minutes

- **P. Louis**, M. Sow, MK. Robleh Isman, C. Atinkpahoun, MN. Pons, D.A.L. Vignati : Les Terres Rares dans les eaux de la Moselle en amont de Nancy

- **N. Lachaux**, S. Pain-Devin, E. M. Gross, L. Giamberini : Ecotoxicologie des éléments terres rares dans les milieux aquatiques continentaux

- **E. Fleurbaix**, M. Parant, C. Cossu-Leguille : Ecotoxicological assessment of rare earth elements alone and in mixtures: cellular approach on ZF4 cell line (*Danio rerio*)

- **A. Otero-Farina**, J. E. Groenenberg, Modelling Rare Earth Elements bound to humic substances.

10h40-11h Discussion & conclusion

11h-11h15 Pause café

11h15-12h30 Table ronde : Les métiers autour des ressources minérales. Quelles évolutions, quelles formations ? Vision à 20 ans, avec des représentants des formations et de l'industrie.

Avec les participations de Olivier Cardon (ORANO), Michel Jébrak (UQAM), Jean Michel Negroni (IMERYS), Judith Sausse (ENSG) et les responsables des formations en Sciences de la Terre et Environnement

Session Agromine et réhabilitation des sols miniers

14h-14h30 **Sophie Leguédois**, LSE : Requalification d'anciens sols de sites miniers

14h30-15h10 Claire Hazotte, LRGP : Méthodes d'extraction du nickel à partir des cendres végétales

15h10-15h40 Les recherches en cours

Présentations courtes de 3 minutes

N. Janot, H. Huot, S. Leguédais, G. Séré, Ye-Tao Tang, J.-L. Morel, R.-L. Qiu, J. E. Groenenberg, Spéciation des terres rares dans des stériles miniers : Étude expérimentale et modélisation

J. Bonhoure , O. Pourret, B. Lange, M.-P. Faucon : Distribution des métaux dans les sols d'une zone d'activité minière au Katanga (République Démocratique du Congo)

R. Tisserand, A. van der Ent, P. D. Erskine, G. Echevarria : The Ni biogeochemical cycle in a tropical metal agromining crop system: Presentation of the study

M. Guilpain : comment extraire le nickel sans brûler la plante ?

Z. Chour : l'agromine des terres rares.

15h40-16h Discussion et conclusions

16h -16h15 Pause

16h15-18h00 Table ronde : Retours d'expérience sur la concertation dans le domaine minier

Animateur : Yann Gunzburger, GeoRessources, LabEx R21,

Avec les participations de Michel Jébrak (UQAM), Gilles Récoché (ORANO), Isabelle Duhamel-Achin (BRGM), Jacques Testard et Julien Merlin.

18h-19h Posters & Rafrachissements

Les métaux dans les écosystèmes aquatiques : Devenir et Effets

Laetitia Minguez

Université de Lorraine, CNRS UMR 7360, Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux (LIEC), Campus Bridoux, Rue du Général Delestraint, 57070 Metz, France
laetitia.minguez@univ-lorraine.fr

La pollution des écosystèmes aquatiques par les métaux est le résultat de processus naturels, tels que les éruptions volcaniques, l'érosion des sols et des roches, et de diverses activités humaines impliquant l'extraction, la transformation ou l'utilisation de métaux et/ou de substances contenant des métaux (e.g. exploitation minière, eaux usées, pratiques agricoles, applications médicales). Bien que certains métaux soient indispensables au métabolisme des êtres-vivants à petites doses (par exemple le zinc, le cuivre, le sélénium), en excès la plupart d'entre eux sont toxiques.

Nous verrons au cours de cette présentation que l'impact de ces métaux sur la santé des écosystèmes aquatiques n'est pas si simple à prédire. De nombreux facteurs abiotiques et biotiques jouent des rôles clefs dans le transfert de ces éléments du milieu vers le biote et d'un organisme à l'autre. Un état de l'art succinct des connaissances actuelles sur le comportement des métaux dans les écosystèmes aquatiques, sur leur accumulation par les organismes et sur leurs mécanismes de toxicité et effets écologiques sera également présenté.

Modeling REE speciation in organic-rich waters

Rémi Marsac^{1*}, Mathieu Pédro¹, Mélanie Davranche¹, Aline Dia¹, Gérard Gruau¹,
Andreas Voegelin²

¹ Univ Rennes, CNRS, Géosciences Rennes - UMR 6118, F-35000 Rennes, France

² Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), 8600 Duebendorf, Switzerland

* auteur pour la correspondance : remi.marsac@univ-rennes1.fr

Because of their relatively recent and increasing use for many applications (technical, medical, catalytic, etc) and inevitable released to the environment, rare earth elements (REE) are now considered as emerging contaminants [1]. Transport and toxicity of a contaminant are highly related to its distribution amongst defined chemical species (e.g. aqueous ions, dissolved complexes with (in)organic anions, adsorbed at mineral surfaces, in bulk solid phases, etc), that is, its speciation. Geochemical speciation modeling is a powerful tool to understand and predict the fate of contaminants in the environment, and a decision support tool for risk assessments and development of remediation strategies. Therefore, it becomes urgent to develop geochemical speciation models for REE.

Because of their similar and coherent chemical properties, naturally occurring REE (at trace levels) have fascinated geochemists for decades. While all REE are most stable under +III oxidation state in water, cerium is sensitive to redox conditions (Ce(III)/Ce(IV)), which drastically affects its geochemical behavior and produces so called Ce anomaly on REE patterns used as tracer of paleo-redox conditions [2]. Furthermore, due to subtle differences in their chemical behavior, REE fractionation between water and natural colloids/particles occurs. In surface environments, REE patterns are affected by various biogeochemical processes (e.g. [3]). Hence, by contrast with other contaminants whose speciation can only be determined by advanced analytical/spectroscopic techniques, REE patterns directly show REE speciation. However, the meaning of REE patterns has to be fully understood. For instance, although REE speciation can strongly be affected by natural organic matter (NOM), various REE-NOM binding patterns can be observed depending on physico-chemical conditions.

This study will present previous and ongoing work dedicated to REE speciation in organic-rich waters, especially how NOM heterogeneity [4], the presence of cations (Al^{3+} , Fe^{3+}) [5] and anions (CO_3^{2-}) [6] affect REE-NOM binding patterns, Ce redox speciation and the formation of CeO_2 nanoparticles [7], and how these mechanisms can numerically be quantified and predicted.

References:

- [1] Merschel, G. and Bau, M. (2015) *Sci. Total Environ.*, 533: 91.
- [2] German, C. R. and Elderfield, H. (1990) *Paleoceanography*, 5: 823.
- [3] Davranche, M. et al. (2015) *Aquat. Geochem.*, 21: 197.
- [4] Marsac, R. et al. (2011) *Geochim. Cosmochim. Acta*, 75: 5625.
- [5] Marsac, R. et al. (2013) *Chem. Geol.*, 342: 119.
- [6] Pourret, O. et al. (2008) *Chem. Geol.*, 251: 120.
- [7] Marsac, R. et al. (2017) *Dalton Trans.*, 46: 13553.

Expositions Professionnelles aux Terres Rares: Connaissances et Perspectives

Giovanni Pagano^{1*}, Philippe J. Thomas², Marco Trifuoggi¹

¹ Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Scienze Chimiche, I-80126 Naples, Italie

² Environment and Climate Change Canada, Science & Technology Branch, National Wildlife Research Center – Carleton University, Ottawa, Ontario K1A 0H3, Canada

Plusieurs études conduites lors des dernières décennies ont permis la production d'une imposante quantité de publications scientifiques sur les impacts écotoxicologiques des terres rares (TR) sur divers organismes. Contrairement aux études expérimentales, les conséquences sur la santé humaine, à la suite des expositions aux TR, ont reçu relativement moins d'attention. Des études géographiques ont été conduites sur les résidents dans certains districts miniers chinois, où la majorité de l'extraction de TR a lieu. Durant ces investigations, la bioaccumulation des TR ainsi que des pathologies marquées ont été mises en évidence. Comme pour les expositions professionnelles aux TR, une série plus limitée d'études a associée ces expositions à plusieurs pathologies distinctes, comme par exemple l'association chez les opérateurs de cinéma (avec présence d'aérosol de cérium) avec l'apparition de pneumoconiose. Des effets similaires ont été publiés chez d'autres travailleurs, tels qu'un employé utilisant un broyeur de lentilles et un imprimeur exposé à une émission de lampe à arc au carbone (qui contient TR). Comme pour les occupations liées à l'extraction minière des TR, ainsi que pour l'usinage des minéraux, on a récemment déterminé les taux d'expositions aux TR par rapport à leurs niveaux dans les cheveux humains, ou dans l'urine. Néanmoins, on ne trouve pas encore d'études focalisées sur les effets pathologiques à long terme parmi ces travailleurs. Une enquête scientifique a été mise en point dans les travailleurs engagés dans la séparation des déchets électroniques, qui a démontré certaines altérations de plusieurs marqueurs plasmatiques. Dans le domaine d'autres expositions professionnelles aux TR, on compte a) les ateliers mécaniques, avec expositions aux échappements diesel, riches en nanoCeO₂ et, b) la production et l'usinage d'aimants à base de TR servant dans les moteurs hybrides et pour les éoliennes. Les microparticules des échappements diesel ont été étudiées avec des modèles animaux, liant l'exposition par voie respiratoire ou systémique à une baisse de santé. D'autre côté, une littérature expérimentale testifie des effets nuisibles des champs magnétiques, dans la manque de données sur la santé humaine. Notre étude en cours sur les niveaux de TR dans l'urine et les cheveux des ouvriers des ateliers mécaniques, par rapport à des travailleurs non exposés, montre l'absorption et le métabolisme de TR chez les sujets exposés. Ces connaissances limitées offriront les données de bases nécessaires pour des enquêtes futures chez les travailleurs engagés dans les ateliers mécaniques et, en perspective, engages dans la production et la manipulation d'aimants supermagnétiques.

References:

- Rim, K.-T. et al. (2013) *Saf. Health Work* 4: 12-26.
Gonzalez, V. et al. (2014) *Environ. Int.* 71: 148-157.
Pagano, G. et al. (2015) *Environ. Res.* 142: 215-220.

Les Terres Rares dans les eaux de la Moselle en amont de Nancy

P. Louis^{1*}, M. Sow¹, MK. Robleh Isman¹, C. Atinkpahoun¹, MN. Pons¹, D.A.L. Vignati²

1LRGP, CNRS, UMR 7274, Université de Lorraine, 1 rue Grandville, BP 20451, 54001, Nancy Cedex, France.

2LIEC, CNRS, UMR 7360, Université de Lorraine, 57070, Metz, France

** Corresponding Author, pauline.louis@univ-lorraine.fr*

Les Terres Rares (TRs) ont des applications nombreuses et croissantes dans les domaines des nouvelles technologies, de l'électronique, des énergies et/ou du médical. Ces utilisations anthropiques perturbent le cycle géochimique et biologique des TRs et entraînent un enrichissement en Gd, La, Ce, et Sm dans les eaux. Les effluents de Station de Traitement des Eaux Urbaines (STEU) sont l'une des sources principales de TRs anthropiques dans les milieux aquatiques. Certaines TRs ne sont pas éliminées par les traitements conventionnels des STEU, notamment le Gd anthropique. Ainsi, la concentration en TRs mesurée près des zones de rejet des effluents de STEU peut être suffisamment importante pour générer des effets sur les systèmes aquatiques^[1]. La présence de TRs dans les eaux usées pourrait également avoir un impact sur l'efficacité des traitements utilisés, notamment sur le traitement biologique^[2]. Connaître les mélanges de TRs, leur concentration et leur distributions au sein des STEU est de ce fait nécessaire pour conduire de plus amples recherches écotoxicologiques sur les effets combinés d'un mélange de TRs sur l'environnement en relation avec l'efficacité du traitement des eaux.

La métropole du Grand Nancy, qui englobe 320 000 habitants, utilise comme unique source d'eau potable les eaux de la Moselle. Des recherches ont été menées pour déterminer les concentrations en TRs dans les eaux de la Moselle entre la source et la prise d'eau pour la station de production d'eau potable ; afin de constater si de potentielles anomalies en TRs pouvaient être détectées, et, le cas échéant, se retrouver dans l'eau potable et donc dans les eaux usées. Ces campagnes ont été menées sur plusieurs années et en différentes saisons (hautes eaux et basses eaux). Les résultats ont montré la présence d'une faible anomalie positive au Gd dans les eaux de la Moselle, ainsi que des spectres de TRs distincts selon les géologies traversées.

References:

- [1] González V, Vignati DAL, Pons M-N, Montarges-Pelletier E, Bojic C, Giamberini L. 2015. Lanthanide ecotoxicity: First attempt to measure environmental risk for aquatic organisms. *Environmental Pollution*. 199(0):139-147
- [2] Fujita Y, Barnes J, Eslamimanesh A, Lencka MM, Anderko A, Riman RE, Navrotsky A. 2015. Effects of simulated rare earth recycling wastewaters on biological nitrification. *Environ Sci Technol*.

Ecotoxicologie des éléments terres rares dans les milieux aquatiques continentaux

LACHAUX Nicolas^{1*}, PAIN-DEVIN Sandrine¹, GROSS Elisabeth Maria¹, GIAMBERINI Laure¹

¹ LIEC UMR 7360 CNRS, Université de Lorraine, Rue du Général Delestraint, METZ, 57070, France

*email : lachaux.n@gmail.com

L'utilisation croissante des éléments terres rares (ETR) pour diverses et nombreuses applications est à l'origine d'anomalies positives en ETR dans l'environnement (Hissler et al. 2015). Grâce à leurs propriétés physico-chimiques particulières, ces éléments sont devenus des métaux stratégiques dont la production et l'utilisation devraient augmenter dans les années à venir (Rollat et al., 2016). Or, l'écotoxicologie de ces polluants émergents reste actuellement mal comprise. Les résultats présentés concernent une partie des travaux réalisés lors d'un stage de M2, intégré dans le projet ANR Ecotree portant sur les effets biologiques et la spéciation des Eléments Terres Rares dans les milieux d'eau douce. Des tests d'écotoxicité aigue ont été menés pour évaluer la capacité des ETR à inhiber la mobilité d'un crustacé d'eau douce, *Daphnia magna* (ISO 6341, 2012). Le néodyme (Nd), le gadolinium (Gd) et l'ytterbium (Yb) ont été testés individuellement, en absence et en présence de matière organique dissoute (MOD : 8 mg/L de carbone organique dissous). Le Nd est l'élément ayant la plus forte toxicité et l'Yb la plus faible ce qui montre ici une diminution de la toxicité avec l'augmentation du numéro atomique de l'élément. La MOD diminue significativement la toxicité du Nd et Gd probablement par la formation de complexes MOD-ETR réduisant la biodisponibilité des ETR.

Dans la continuité de ce stage, je poursuis les recherches sur l'écotoxicologie des ETR, dans le cadre du projet Ecotree, avec une thèse portant sur les « Impacts écotoxicologiques d'éléments terres rares à différents niveaux d'organisation biologiques dans un réseau d'eau douce : approches intégrées en mésocosmes indoor ». Cette thèse permettra d'apporter de nouvelles connaissances sur les effets des ETR à différents niveaux biologiques en reproduisant des conditions d'exposition réalistes d'un point de vue environnemental qui ont été très peu utilisées jusqu'à présent pour étudier l'écotoxicologie des ETR.

References:

- Hissler, C. et al. (2015) C. R. Geoscience 347 (2015) 294-303
Rollat, A. et al. (2016) Waste Management 49 (2016) 427-436

Ecotoxicological assessment of rare earth elements alone and in mixtures: cellular approach on ZF4 cell line (Danio rerio)

Fleurbaix E.¹, Parant M.¹, Cossu-Leguille C.¹

1- LIEC, UMR CNRS 7360, Université de Lorraine, rue du Général Delestraint, Metz, 57070, France

Rare Earth Elements (REEs) are used in high-tech devices (solar panels, liquid-crystal display...) and other industrial activities (automobile, pharmaceutical, agricultural...). However, because of political and economic regards, little attention has been developed towards the risk assessment associated with their use. Consequently, due to a lack of ecotoxicological data, no regulatory thresholds for environmental REE concentrations have been set so far. In this context, the aim of this doctoral research is to study the toxic effects and the associated mechanisms of action of REEs on living organisms. The experimentations are carried out with REE alone or in mixtures by using cellular approaches.

An *in vitro* screening of REEs impact was carried out in nominal increasing concentrations up to 3 mM during 96h of exposure on the ZF4 cell line (Danio rerio, ATCC CTRL 2050). Cytotoxicity of 3 binary mixtures (Nd-Gd, Nd-Yb and Gd-Yb) was also performed during 96h of exposure on the ZF4 cells. Different combinations in binary mixtures were established from the toxicity threshold values EC₅₀, NOEC and LOEC of the screening to estimate their potential synergic effects. The cell viability, determined by an MTT assay (colorimetric method to quantize the reduction of tetrazolium salt) was used as a toxic effect parameter for this two sets of experiments.

After 24h, 48h, 72h and 96h of exposure, a dose-response relationship was observed for the 14 REE. Cytotoxic effects were obtained with EC₅₀ values of 1 mM on ZF4 cells. However, a more important cytotoxic effect was observed with Nd, Er, Tm, Yb and Lu. Synergistic effects were described for the different combinations of these REE in binary mixtures (low and high REE nominal concentrations of exposure). We can conclude that REEs toxicity is of the same order when tested alone. The combined effects described for binary mixtures in our study must be considered for the risk assessment of REEs. We will now investigate the mechanistic activities of these effects on the ZF4 cells and other cell lines in order to better understand the pathways of REE toxicity.

Modelling Rare Earth Elements bound to humic substances

A. OTERO-FARIÑA¹ AND J. E. GROENENBERG^{1,2}

1 LIEC: Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux, UMR 7360 CNRS-Université de Lorraine 15, Avenue du Charmois, F-54500 Vandoeuvre-lès-Nancy – France (alba.otero-farina@univ-lorraine.fr)

2 Department of Soil Quality Wageningen University, Wageningen University and Research, P.O. box 47, 6700 AA Wageningen, the Netherlands

The biogeochemical cycle of Rare Earth Elements (REEs) is being affected by their increased use in the production of high-tech and communication devices and in medical applications. Due to its increase used enrichment of certain REEs has been detected in natural waters.

No regulatory thresholds for REE concentrations and emissions into the environment are set as present knowledge on the environmental behaviour and effects of REEs is scarce. The fate and behaviour of REEs in the environment is largely determined by their binding to reactive components, of which organic matter, metal oxides, and clays are considered important. The use of thermodynamic models which predict the partitioning and speciation of trace metals in terrestrial and aquatic systems is of key importance. Ion binding models have allowed to understand the environmental cycling of trace elements in which humic substances (HS, humic and fulvic acids) are the most reactive fractions of natural organic matter, presenting a high affinity for metal ions. However, their reactivity is difficult to study due to their colloidal nature, associated with a heterogeneous affinity distribution. The NICA-Donnan model (NDM) is one of the most used models for ion binding to HS however, at present there are no NDM parameters for REEs binding to HS except Eu.

Here we obtain generic ND parameters for all the 14 stable lanthanides based on published data on their binding to HS. The geochemical speciation program ORCHESTRA in combination with the parameter optimization software PEST were used to fit the experimental data with the NDM. The newly derived model parameters are evaluated with published experimental data on REE binding to HS in competition with other metals and were used to predict the solid solution partitioning in soils using a multi-surface model and compared with previously obtained experimental data, thus allowing a better understanding of the environmental cycling of these elements

Requalification d'anciens sites miniers

**Sophie Leguédois^{1*}, Guillaume. Echevarria¹, Hermine Huot², Michel-Pierre Faucon³,
Noémie Janot^{1,4}, Reuben Nilus⁵, Jean-François Masfaraud⁶, Jean Louis Morel¹,
Rongliang Qiu², Celestino Quintela-Sabaris¹, Rimi Repin⁷, Geoffroy Séré¹, John B.
Sugau⁸, Ye-Tao Tang²**

¹ Université de Lorraine, Inra, LSE, F-54000 Nancy, France

² School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, China

³ Institut Polytechnique UniLaSalle, CNRS, AGHYLE, F-60155 Beauvais, France

⁴ Université de Lorraine, CNRS, LIEC, F-54000 Nancy, France

⁵ Forest Research Centre, Sabah Forestry Department, 90715 Sandakan,
Sabah, Malaysia

⁶ Université de Lorraine, CNRS, LIEC, F-57000 Metz, France

⁷ Sabah Parks, 88806 Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia

⁸ Forest Research Centre, Sabah Forestry Department, Sandakan, Sabah, Malaysia

* auteur pour la correspondance : sophie.leguedois@univ-lorraine.fr

La requalification de sites miniers nécessite des opérations de transformation du sol. Il peut s'agir d'opérations visant la remédiation de la contamination, la remise en état de fonctions ou de services écosystémiques d'intérêt, la réhabilitation d'un écosystème de remplacement ou la restauration de l'écosystème initial.

Les opérations nécessaires à une requalification font donc appel à une variété de procédés dont le coût est très inégal. Dans ce travail, nous prôtons une approche environnementale globale, ancrée dans le territoire, à la fois pour concevoir de nouvelles techniques et pour évaluer les performances de ces opérations. Nous illustrons nos propos avec des exemples issus d'opérations de remise en état et de réhabilitation de sites miniers de terres rares en Chine du Sude et de milieux ultramafiques en Malaisie. En ce qui concerne la conception de nouvelles techniques de réhabilitation, nous proposons une approche d'ingénierie écologique afin de viser performance environnementale et pertinence au sein du territoire. Ainsi la prospection des milieux environnants à des sites dégradés a permis de déterminer des stratégies de végétalisation adaptées (p. ex. traits fonctionnels, repérage d'espèces améliorantes) et de proposer des stratégies de requalification intégrées (p. ex. agromine de Ni, phytoextraction de terres rares). Par ailleurs, la détermination de gisements de matières secondaires intéressantes pour l'amélioration des sols (p. ex. déchets de palmier à huile sur Bornéo, topsoil) peut permettre d'identifier des ressources pertinentes pour un site donné.

Pour ce qui est des évaluations, classiquement, le succès d'une opération de réhabilitation est estimé à partir des paramètres physico-chimiques des sols, éventuellement couplés avec des données sur la microbiologie des sols et l'examen des communautés végétales en place et, plus rarement, en considérant la réalisation de services écosystémiques. Or, des évaluations globales sont indispensables. Ainsi, dans un travail réalisé sur des milieux ultramafiques dégradés nous avons montré que le niveau d'amélioration des quatre fonctions écosystémiques évaluées n'est pas corrélée à l'intensité technique mise en œuvre pour la réhabilitation, en particulier en ce qui concerne la filtration de l'eau.

Méthodes d'extraction du nickel à partir de cendres végétales

Marie-Odile SIMONNOT^{1*}, Baptiste LAUBIE¹, Claire HAZOTTE^{1,2}

¹ Laboratoire Réactions et Génie des Procédés, UMR 7274 Université de Lorraine – CNRS, 1 rue Grandville BP20451, 54001 Nancy Cedex

² ECONICK, 1 rue Grandville BP20451, 54001 Nancy Cedex

* auteur pour la correspondance : marie-odile.simonnot@univ-lorraine.fr

L'agromine est la chaîne de procédés qui consiste à 1) extraire le métal d'un sol à l'aide de plantes hyperaccumulatrices et 2) extraire et isoler ce métal à partir de la biomasse des plantes, le plus souvent par hydrométallurgie.

Cette présentation se focalisera sur la récupération du nickel (Ni) à partir de la biomasse de plantes hyperaccumulatrices, et particulièrement d'*Alyssum murale*. La plante sèche, qui contient jusqu'à 1% (mass.) de Ni dans ses parties aériennes, est brûlée pour produire des cendres. Ainsi, la matière organique est éliminée, et les cendres contiennent jusqu'à 15-20% (mass.) de Ni. Les cendres sont ensuite traitées par différentes opérations de l'hydrométallurgie (lavage, lixiviation, précipitation/dissolution) pour obtenir un sel ou l'oxyde de Ni.

Ce procédé a été largement étudié à l'échelle du laboratoire, puis transposé à l'échelle du pilote. La combustion de la plante est l'étape la plus sensible, car la composition minéralogique des cendres dépend de la température. La robustesse du procédé a été démontrée aux différentes échelles et le procédé fonctionne très bien en dépit de la variabilité des cendres. Le pouvoir calorifique des plantes a aussi été mesuré, ce qui donne des voies de valorisation de l'énergie produite. Enfin, le procédé a été testé avec différentes plantes hyperaccumulatrices, il peut s'adapter assez facilement en fonction de la composition des biomasses des plantes.

En conclusion, le procédé qui consiste à brûler les plantes hyperaccumulatrices et récupérer le Ni a démontré sa faisabilité ainsi que ses faibles impacts sur l'environnement, grâce à une analyse du cycle de vie. Actuellement, une autre voie est explorée, qui consiste à récupérer le Ni sans brûler la plante, ce qui comporte d'autres avantages et inconvénients.

References:

Barbaroux, R. et al. (2012) Sci. Tot. Environ. 423:111

Houzelot, V. et al. (2017) Chem. Eng. Res. and Des. 120:26

Van der Ent, A. et al. (2015) Environ. Sci. Technol. 49(8):4773

van der Ent, A. et al. (2018) Agromining: Farming for Metals: Extracting Unconventional Resources Using Plants. Springer

Spéciation des terres rares dans des stériles miniers : Étude expérimentale et modélisation

Noémie Janot^{1,2*}, Hermine Huot³, Sophie Leguëdois¹, Geoffroy Séré¹, Ye-Tao Tang³, Jean-Louis Morel¹, Rong-Liang Qiu³, Jan E. Groenenberg^{2,4}

¹ LSE, 2 avenue de la Forêt de Haye, Vandœuvre-lès-Nancy, 54518, France

² LIEC, 15 avenue du Charmois, Vandœuvre-lès-Nancy, 54500, France

³ School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Chine

⁴ Department of Soil Quality Wageningen University, Droevendaalsesteeg 4, Wageningen, 6708PB, Pays-Bas

* noemie.janot@univ-lorraine.fr

Les terres rares (TR) sont un groupe de métaux stratégiques car devenus essentiels à la plupart des technologies de pointe. Parmi les gisements de TR connus, ceux d'argiles ioniques qui sont spécifiques au sud de la Chine représentaient en 2017 30% de la production mondiale. Leur exploitation a été traditionnellement effectuée par lixiviation de sulfate d'ammonium, engendrant d'importants dommages environnementaux. A l'heure actuelle, la remédiation des stériles miniers issus de cette exploitation est rendue difficile à la fois par leur très faible fertilité physico-chimique et leurs concentrations résiduelles en TR.

Les modes de gestion à faible coût tel quel le génie écologique (succession naturelle, phytoremédiation) ou l'utilisation d'amendements organiques couplée à la culture de biomasse à vocation non alimentaire apparaissent comme des solutions pertinentes pour requalifier ces matériaux. Ces pratiques modifient néanmoins les paramètres biogéochimiques des sols, et donc la biodisponibilité des nutriments et des TR, impactant la durabilité de la remédiation.

L'objectif de ce projet est de comprendre l'impact de ces pratiques sur le comportement des TR dans ces matériaux. Pour cela, nous avons étudié des stériles miniers abandonnés il y a 10 ans sur un site situé à Ganzhou, dans la province du Jiangxi. En 2016 des parcelles expérimentales (2x2m²) ont été mises en place au sommet des stériles afin d'étudier plusieurs stratégies de phytoremédiation (différentes quantités d'apport organique et plantation d'herbes vivaces, cultures de plantes à fibres, plantes hyperaccumulatrices de TR). Elles permettent de tester en conditions réelles les différentes solutions de gestion tout en suivant au cours du temps le développement des plantes et l'évolution des propriétés des sols.

Afin d'évaluer les différentes techniques testées, nous avons développé un modèle géochimique décrivant la spéciation des TR dans ces matériaux. Ce modèle multi-surface a été paramétré pour la complexation de surface des TR dans les sols et sédiments dans le logiciel ORCHESTRA, afin de prédire l'extractibilité des TR par une solution de CaCl₂, mimant la biodisponibilité. Le modèle est évalué en comparant ses résultats avec les données expérimentales des échantillons provenant de différentes parcelles, en fonction de leur pH et des teneurs en TR, matière organique, argiles et (hydr)oxydes de Fe/Al. Les résultats de cette modélisation montrent l'influence primordiale du pH et de la teneur en matière organique dans la spéciation et la distribution des TR.

Distribution des métaux dans les sols d'une zone d'activité minière au Katanga (République Démocratique du Congo)

Bonhoure J.^{1*}, Pourret O.¹ Lange B.¹, Faucon M-P.¹

¹ AGHYLE, UniLaSalle, 19 rue Pierre Waguet - BP 30313 - F-60026 BEAUVAIS, France

* jessica.bonhoure@unilasalle.fr

La ceinture de cuivre du Katanga (au SE de la République Démocratique du Congo) est la plus grande province sédimentaire stratiforme à Cu-Co du monde [1]. Cette minéralisation se compose essentiellement de sulfures de Cu-Co (chalcopryrite, carrollite, bornite, chalcocite), oxydée en surface (malachite, hétérogénite, chrysocolle, azurite). La minéralisation primaire est liée à des circulations de fluides ayant lessivé les roches du socle granitique, ou les sédiments arénitiques dérivés [2]. Les concentrations élevées en métaux (Cu, Co, As, Zn, Pb, Cd, Fe, U) dans les sols du Katanga sont principalement issues du fond géologique dont les sols ont fini par dériver, mais leur fractionnement et leurs abondances montrent également une origine liée à l'activité minière et aux résidus de fonderie, ainsi qu'une répartition variable suivant les compartiments du sol [3].

Dans cette étude, 234 échantillons de sol ont été étudiés : l'analyse du facteur d'enrichissement indique que le Cu et le Co sont extrêmement enrichis, le fractionnement et la mobilité ces deux éléments sont ainsi évalués en utilisant à la fois une extraction ammonium acetate-EDTA et une modélisation de spéciation (WHAM 6) [3]. Les données obtenues couvrent un large éventail de conditions environnementales (pH, concentration en métaux traces, sols naturels ou industriels).

Ces résultats montrent que seule une faible proportion du Cu et du Co est mobile, avec cependant une augmentation de cette mobilité dans les sols affectés par les activités minières. La modélisation de la spéciation du Cu-Co des sites contaminés souligne une adsorption forte du Cu par la matière organique, tandis que le Co montre une forte affinité pour les oxydes de Mn. Les sols du Katanga, riches en Fe et Mn, jouent ainsi un rôle protecteur contre les effets toxiques de ces métaux.

Dans le cadre du suivi environnemental des sites miniers, une meilleure compréhension du fractionnement et de la spéciation des métaux peut ainsi aider à la mise en place de différentes pratiques de phytoremédiation.

References:

[1] Cailteux J.L.H. et al. (2007) Gondwana Research 11, 414–431. [2] El Desouky et al., (2010) Miner Deposita 45, 735–763. [3] Pourret O. et al. (2016) Appl. Geochem. 64, 43-55.

The Ni biogeochemical cycle in a tropical metal agromining crop system: Presentation of the study

Romane Tisserand^{1,2}, Antony van der Ent^{1,2}, Peter D. Erskine² and Guillaume Echevarria^{1,2*}

¹Université de Lorraine, INRA, Laboratoire Sols et Environnement, 54000 Nancy, France.

²Centre for Mined Land Rehabilitation, Sustainable Minerals Institute, The University of Queensland, Australia.

*Corresponding author : Guillaume Echevarria

Agromining is an integrated chain that involves growing native hyperaccumulator plant species ('metal crops') on either mineralized (ultramafic) soils or mine wastes prior to biomass harvesting and incineration in order to recover metals or salts. The agronomy of tropical 'metal crops' had not been yet tested until Philip Nkrumah did his PhD on the conditions for the optimization of the growth and development of two hypernickelophores from Sabah (Malaysia), *i.e.* *Rinorea aff. bengalensis* and *Phyllanthus rufuschaneyi* (Nkrumah et al., 2018).

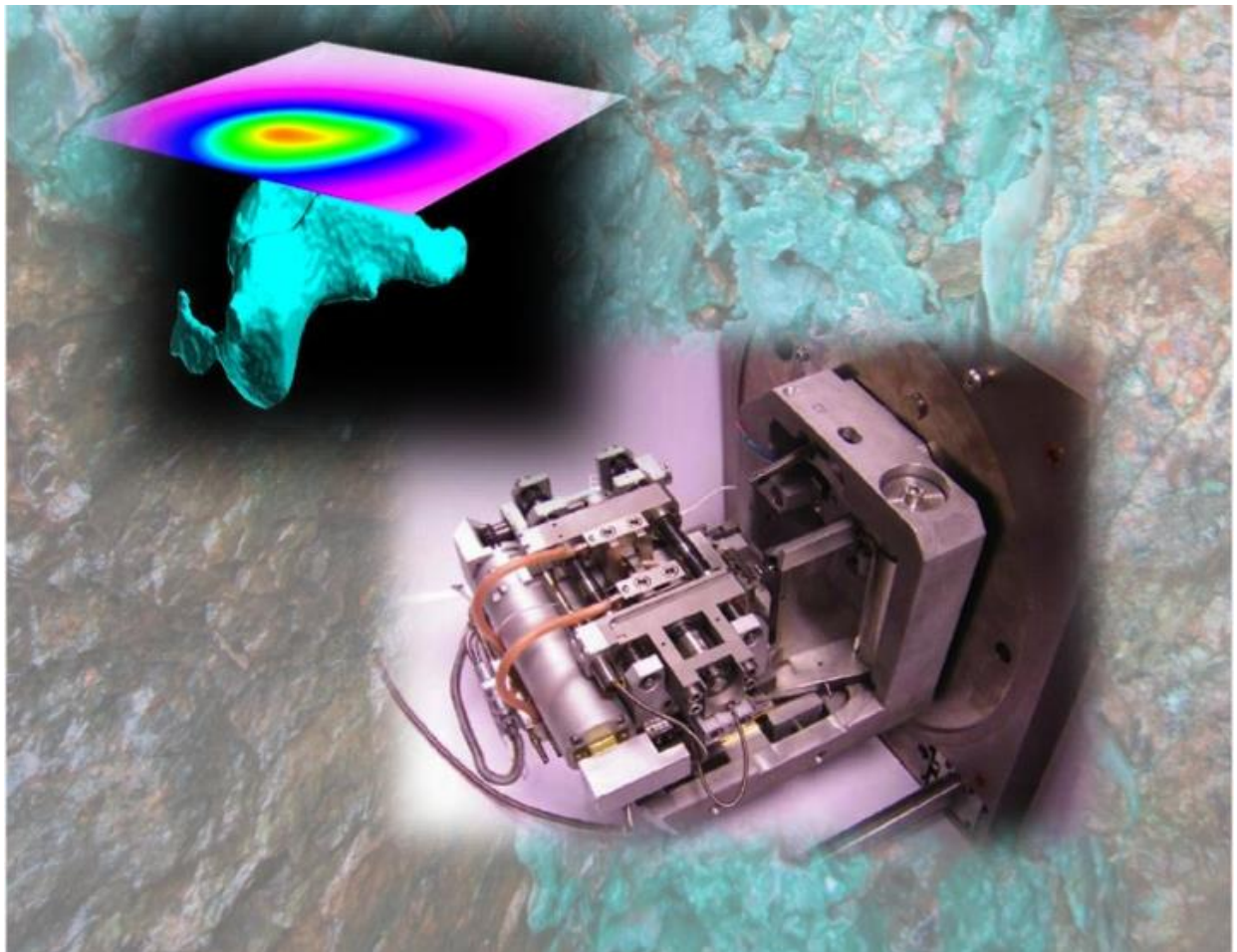
To achieve a sustainable management of agromining, it is essential to understand the functioning of hyperaccumulators ecosystems by carefully assessing the biogeochemical cycles at the stand scale and by characterizing the different components, fluxes and processes involved. The aim of this study is to characterize all elements fluxes, notably for Ni, and to assess the effect of a range of harvesting scenarios and biomass recycling on these fluxes. To study the Ni biogeochemical cycle, it is necessary to set up a designed field experimental system that can be manipulated in order to set up specific experiments. It involves the monitoring of elemental concentrations in biomass, soil and water fluxes.

This project comprises a large randomized-block trial in which we control the quantity of litter allowed to decay, and a fully characterized 1.5-ha agromining plot. The latter is situated on an ultramafic Eutric Cambisol Magnesian with a high total Ni concentration (>2000 µg g⁻¹) which shares many physico-chemical characteristics with saprolitic mine wastes (including the Ni-bearing phases). Nine 25-m² plots planted with *P. rufuschaneyi* were instrumented with a biogeochemical station in which all fluxes are monitored by the devices that were installed in March 2018. This study is critical to provide 'real-life' demonstration of viable tropical Ni agromining and to provide some crucial elements determine how long is the soil able to sustain this activity.

References :

Nkrumah, P.N., Chaney, R.L., Morel, J.L., 2018. Agronomy of 'Metal Crops' Used in Agromining in : Reeves, R.D., van der Ent, A., Baker, A.J.M. Agromining: Farming for Metals, Mineral Resource Reviews, 1-312.

Jeudi 4 Octobre 2018



Jeudi 4 octobre 2018

Visites de laboratoires sur Nancy autour des plateformes analytiques

Visite 1 : GeoRessources – FST Jeudi 4 octobre matin 9-12h

-Analyse localisée et Imagerie (LA-ICPMS, XRF, MEB, Microsonde) : MC Boiron, C Peiffert, J Mercadier, J Cauzid, M Cathelineau

-Techniques spectroscopiques Raman et Infra-Rouge : MC Caumon et O Barrès

-Instruments d'exploration portables (Banc d'observation de carottes de forage : LIBS, XRF) : J Cauzid, C Fabre, P Robert

Visite 2 : GeoRessources - Batiments E et F : Jeudi 4 octobre *après-midi* 13h30-16h Modélisation, G Caumon et F Golfier

Visite 3 : GeoRessources - Bâtiment A : Steval et Hydroval, Jeudi 4 octobre matin 9-12h

A Chagnes et L Filippov

Visite 4 - CRPG Jeudi 4 octobre *après-midi* 13h30-16h

-Datation Sonde ionique : J Mercadier, E Deloule

-MCC-ICPMS Isotopie-SARM, Spectrométrie Gaz rares : R Pik, C Cloquet, B Luais, L Reisberg

<http://ressources21.univ-lorraine.fr>



Ecole thématique CNRS

Cycle Géochimique des Métaux

2 – 4 Octobre 2018
Nancy

