

R*

* LA LETTRE DE LA RECHERCHE DU **BRGM**

N°6 OCTOBRE 2017



GRAND ANGLE

► PAR JORDI BRUNO

Docteur en chimie, professeur à l'Université polytechnique de Catalogne et président du groupe Amphos 21, spécialisé dans la gestion environnementale, en particulier des déchets nucléaires et miniers.

Parce que les démarches d'acquisition de la connaissance géologique privilégiaient les aspects physiologiques et chimiques, la géochimie est longtemps demeurée abiotique. Après de premiers travaux, dans les années 80, intégrant la connaissance biologique dans la géochimie, on assiste à une explosion des recherches en ce domaine, avec l'avènement de la biogéochimie.

« Plus que jamais les géosciences doivent entrer dans le monde biotique ! »

Car la vie est partout, y compris dans les milieux les plus hostiles, et l'on sait désormais que les micro-organismes ont joué un rôle essentiel dans l'évolution de la planète.

La biogéochimie permet aujourd'hui aux géologues de mieux comprendre les processus naturels impliqués dans l'origine et l'évolution des eaux souterraines et superficielles. Elle nous renseigne sur la genèse de la formation et sur l'évolution des gisements minéraux, et ouvre des voies nouvelles pour l'extraction de métaux, la gestion des déchets ou encore la bio-remédiation de sites et sols pollués. Dans le domaine souterrain profond, on sait également que les populations microbiennes présentes ont une influence potentielle considérable sur la stabilité des stockages de déchets nucléaires ou de CO₂.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

ENJEUX DE RECHERCHE

Connaître et exploiter de manière optimisée les potentialités des micro-organismes de l'environnement

PARTENARIAT

BRGM - Veolia :
vers une gestion active
des nappes souterraines

INSTITUT CARNOT BRGM

une thèse dédiée aux
processus de biolixiviation



Lixiviation de minerais métalliques par action bactérienne. © Sander monster, HZDR

LES BIOGÉOSCIENCES, DES OUTILS POUR FAIRE FACE AUX DÉFIS ENVIRONNEMENT

L'amélioration de la connaissance et de la maîtrise des processus biogéochimiques ouvre des voies très prometteuses dans les domaines du traitement des déchets, de l'extraction des métaux, de l'économie circulaire, du stockage géologique et de la remédiation des sites et sols pollués. À la clé, des réponses innovantes aux grands enjeux du développement durable.

Mais de nombreux progrès restent à accomplir. Il convient d'acquérir une connaissance des processus biochimiques aux mêmes échelles que celles auxquelles nous appréhendons les processus géochimiques. Et cette connaissance biochimique doit s'intégrer dans les bases de données utilisées pour la modélisation au même niveau que les données géochimiques.

De même convient-il d'identifier et de caractériser les espèces chimiques bioactives les plus importantes dans les processus biochimiques, en s'intéressant en particulier au rôle des phosphates, qui contrôlent l'interface entre les sels présents dans les micro-organismes et l'environnement. Beaucoup reste aussi à apprendre

sur les réactions biochimiques qui contrôlent les processus d'oxydo-réduction (redox), en particulier les transferts d'électrons.

D'importants développements ont été réalisés en matière de bio-procédés. On est en pleine explosion des applications de la biochimie et de la biogéochimie. L'avancée de la connaissance scientifique doit aller de pair.

Alors que l'on connaît mieux la taxonomie des espèces et « l'anatomie » des micro-organismes, il est indispensable de mieux connaître leur « physiologie » et l'ensemble des processus qui en contrôlent le fonctionnement.

Plus que jamais, les géosciences doivent entrer dans le monde biotique. La transition a été engagée, nous devons aller plus loin. ■

ENJEUX DE RECHERCHE |

CONNAÎTRE ET EXPLOITER DE MANIÈRE OPTIMISÉE LES POTENTIALITÉS DES MICRO-ORGANISMES DE L'ENVIRONNEMENT

La compréhension croissante des phénomènes impliquant des micro-organismes en milieu naturel trouve des applications de plus en plus nombreuses en matière de remédiation de l'environnement, de l'économie circulaire et de la transition énergétique. Avec les biogéosciences, le BRGM dispose de nouveaux outils pour répondre aux grands défis sociétaux.

► **PAR DOMINIQUE MORIN**, responsable valorisation, innovation et propriété intellectuelle à la direction du développement du BRGM et **FABIENNE BATTAGLIA-BRUNET**, responsable scientifique de programmes au sein de l'unité géomicrobiologie et monitoring environnemental du BRGM.



L'irruption de la microbiologie dans la géologie est intervenue il y a environ une cinquantaine d'années, avec la découverte de micro-organismes chimio-lithotrophes utilisant des composés minéraux comme source énergétique. À la même époque, une étude sur la migration de l'or par des bactéries au Sénégal faisait grand bruit, ouvrant la porte à de premiers travaux sur la biolixiviation, phénomène naturel de catalyse biologique utilisé pour extraire des métaux.

Dans le cadre du projet Selenas, carottage à Marcilly-en-Gault (en mars 2017) afin d'étudier l'arsenic et le sélénium présents dans les eaux souterraines. © BRGM - F. Battaglia-Brunet

Dans les années 80, le BRGM a ainsi développé, de l'échelle laboratoire à l'échelle industrielle, un procédé de bio-hydrométallurgie appliqué en Ouganda sur un site d'extraction de cuivre qui avait engendré plus d'un million de tonnes de résidus sous la forme de concentré de pyrite, riche en cobalt. Entre 1998 et 2014, date d'épuisement de la ressource, le projet KCC (Kasese Cobalt Company), grâce à la sélection d'un consortium bactérien adapté, a permis d'extraire 800 tonnes de cobalt par an, démontrant la fiabilité d'un tel procédé biotechnologique.

Sur le même principe, le BRGM a développé diverses techniques permettant de dégrader le cyanure utilisé en solution dans les effluents de procédés de récupération de l'or, ou le phénol présent dans des sables de fonderie, afin d'en permettre la réutilisation. Depuis lors, la microbiologie a progressivement investi le champ des géosciences.

Encore de nombreux verrous scientifiques

Tirer parti des propriétés naturelles des bactéries requiert en premier lieu d'observer leurs populations dans un milieu donné, d'en faire l'écologie et d'en isoler les processus les plus remarquables puis d'être en mesure de concentrer ceux-ci pour obtenir des performances suffisantes (techniques, économiques...) permettant de développer un véritable procédé industriel.

La biogéochimie s'intéresse ainsi aux réactions chimiques influencées par le vivant, oxydation, réduction, méthylation, et aux paramètres qui les gouvernent. Il importe, par exemple, de comprendre comment le vivant est susceptible d'induire des modifications dans la forme des métaux et des métalloïdes avec une incidence sur leur toxicité ; des enseignements mis à profit dans le traitement d'effluents miniers concentrés en métaux lourds, notamment.

Mais de nombreux verrous scientifiques se dressent sur le chemin du chercheur, qui tiennent d'abord au caractère potentiellement déséquilibré, car contaminé, des milieux concernés par la mise en œuvre de procédés biotechnologiques :



« Les questions posées aux chercheurs du BRGM portent notamment sur l'influence des facteurs biologiques dans la dissémination et le transfert de substances polluantes dans les milieux, mais également leur capacité à accompagner la résilience de ceux-ci. »

DOMINIQUE MORIN, FABIENNE BATTAGLIA-BRUNET

eaux et sols pollués, déchets, minerais... riches en molécules très agressives envers toute forme de vie. Le contrôle des processus mis en œuvre, pour en garantir la maîtrise et éviter d'induire un risque supplémentaire pour le milieu, en particulier sanitaire, est un autre défi scientifique.

L'environnement en première ligne

S'agissant des milieux pollués ou susceptibles de l'être, eaux ou sites et sols, l'enjeu est aujourd'hui d'apporter aux gestionnaires des recommandations sur les pratiques optimales de protection, de gestion ou de restauration en documentant plus encore les processus d'activité des micro-organismes. Ainsi en va-t-il du projet Selenas (sélénium et arsenic dans la nappe de Beauce-



Réacteur de biolixiviation pour la récupération du cobalt à partir de pyrites cobaltifères (Projet KCC, Ouganda). © BRGM - Dominique Morin

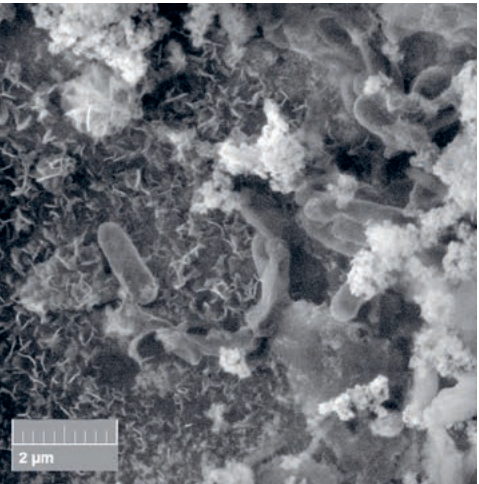
Économie circulaire, énergie...

Le domaine de l'économie circulaire est également directement concerné par les procédés biotechnologiques (voir plus haut) et le BRGM continue de s'y impliquer, avec en particulier le projet ANR IngeCost-DMA, coordonné par le laboratoire HSM Montpellier, dédié à la récupération de métaux – avec dépollution associée – dans des drainages miniers acides. Il est également partie prenante dans plusieurs nouveaux projets visant l'extraction par voie biologique de métaux à partir de déchets ou de stériles miniers (voir « Avancées de la recherche »).

En matière énergétique, l'influence des bactéries dans la corrosion des installations géothermiques (voir « Témoignage ») a été documentée avec l'aide du BRGM, et plusieurs projets de recherche sur le stockage géologique de CO2 intègrent le facteur biologique.

La biochimie, profitant des avancées constantes de la biologie moléculaire, est aujourd'hui totalement intégrée à la géochimie. Toutes les disciplines des sciences de la Terre en tirent profit et les perspectives ouvertes sont multiples. ■

Images MEB de cultures de bactéries issues d'un environnement pollué en présence de nanoparticules de fer. © BRGM



[REDACTED]

Opération de filtration par filtre-pressé après biolixiviation de minerais à cuivre (et avant traitement aval de récupération des métaux). © BRGM

miques demeurent pour adapter les procédés aux caractéristiques des ressources visées.

Ces travaux, en phase d'achèvement, ont permis des avancées significatives en termes

R* / LA LETTRE DE LA RECHERCHE DU BRGM



En vue des questionnements et des besoins
sociétaux, le BRGM développe et optimise des
processus de biolixiviation pour extraire des métaux.
Exemple avec le projet Ecometals. © BRGM

Observation de la viabilité bactérienne grâce à la technique de microscopie Live&Dead : les cellules bactériennes vertes correspondent aux bactéries vivantes et les rouges aux bactéries non vivantes au moment du marquage.



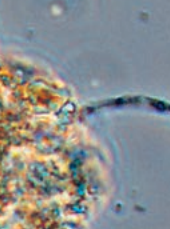
Les applications de la biogéochimie isotopique sont nombreuses, le plus souvent fondées sur une approche multi-isotopique, dans des domaines de la dépollution, de la forensie environnementale (traçage de l'origine d'une pollution) ou encore (voir « Avancées de la Recherche ») pour déterminer l'origine (biologique ou thermogénique) d'un gaz.

► **PAR NICOLAS RAMPNOUX** Hydrogéologue, Responsable Développement Open Innovation de Veolia Recherche et Innovation.



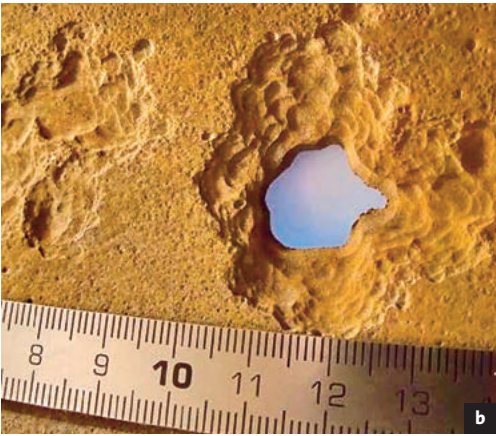
Le réacteur de suivi du pouvoir d'épuration des sols sur un pilote expérimental REUSE - Recyclage des eaux usées (gestion active des nappes en zone littoral). Ici une colonne de sol reconstituée avec infiltration d'eau usée traitée et monitoring par bougies poreuses (France, 2009). © BRGM

Les résultats de différents travaux ont démontré la pertinence du concept de recharge de nappes souterraines. Ils ont débouché sur la réalisation d'un guide opérationnel, prélude à des opérations futures en taille réelle. Pour Veolia, dont l'hydrogéologie n'est pas le cœur de métier, ce partenariat avec le BRGM, référence internationale de la biogéochimie de l'eau dans le milieu naturel, était une évidence. Dans ce partenariat, Veolia a pu apporter au BRGM son expertise dans le domaine du traitement et de recyclage des eaux usées. ■



a) Vue au microscope optique de bactéries filamenteuses du cycle du fer à l'origine de colmatage de canalisations et souvent associées aux bactéries sulfurogènes dans des cas de corrosion localisée.

b) Vue rapprochée de corrosions localisées à la surface d'un tubage en acier. © CFG Services - Sylvie Daumas





Banc de réacteurs batch pour l'étude des phénomènes physico-chimiques intervenant dans la biolixiviation des minerais sulfurés. © BRGM - Ménard



INSTITUT CARNOT BRGM | UNE THÈSE DÉDIÉE AUX PROCESSUS DE BIOLIXIVIATION

Modéliser les processus de biolixiviation afin d'être en mesure d'améliorer les procédés de récupération de métaux dans des ressources à faible teneur : c'est l'enjeu d'une thèse* co-encadrée par le BRGM et le LRGP dans le cadre du ressourcement Carnot.

► **PAR ANNE-GWENAËLLE GUEZENNEC** Co-encadrante au titre du BRGM



La biolixiviation, technique d'extraction de métaux fondée sur l'utilisation de bactéries capables de les convertir de la forme solide à la forme soluble (voir aussi l'article « Ecometals »)

est une alternative aux traitements pyrométallurgiques conventionnels pour récupérer des métaux dans des ressources minérales sulfurées. Optimiser le procédé pour le rendre plus fiable et moins coûteux, et ainsi développer son application aux ressources secondaires de types déchets miniers – ressources potentielles devenues stratégiques –, est un enjeu de recherche majeur.

Modéliser pour optimiser

« L'injection et la dispersion d'oxygène, explique Anne-Gwenaëlle Guezennec, nécessaires aux processus d'oxydation et de solubilisation des métaux dans les réacteurs, requièrent beaucoup d'énergie. La réduction des coûts induits par cette technique permettrait d'assurer une plus grande polyvalence/agilité du procédé et son déploiement industriel sur des ressources variées. »

C'est l'objet de la thèse qui démarre cet automne sur financement Carnot et sous pilotage conjoint du BRGM et du Laboratoire Réaction et génie des Procédés (LRGP – CNRS Nancy). Elle vise à modéliser les processus de biolixiviation avec un objectif d'optimisation des procédés.

« Cette thèse, poursuit A.-G. Guezennec, co-encadrante au titre du BRGM, va s'appuyer sur plusieurs recherches déjà conduites au BRGM dans le cadre du programme européen Promine, ainsi que sur des travaux récents ayant exploré plusieurs voies d'amélioration des procédés de biolixiviation tels Lixoz, Ecometals ou encore Ceres. Son objectif est de développer un modèle permettant de décrire les différents phénomènes de transport dans une cuve de biolixiviation aérée et agitée, en lien avec l'activité biochimique, afin de simuler l'environnement bactérien et son évolution au cours de la biolixiviation. Les principaux verrous scientifiques portent sur les couplages des différents phénomènes en milieu triphasique, gaz, liquide, solide. »

La thèse comportera des développements méthodologiques. ■

* Étude du microenvironnement bactérien dans un réacteur agité et aéré de biolixiviation : apport de la modélisation des phénomènes de transport en milieu triphasique.

THÈSE | TRAITEMENT BIOLOGIQUE D'EAU MINIÈRE SUR SITE

Le gîte aurifère de Lopérec (Finistère) a été découvert par le BRGM lors de l'inventaire minier de la France (1985-1991). Des travaux souterrains y ont été réalisés afin de prélever des échantillons de minerai, mais faute de perspectives économiques, le projet d'exploitation a été abandonné. La galerie de recherche creusée à l'emplacement d'une source constitue un drain pour les eaux (chargées en arsenic, en fer et en manganèse) qui s'écoulaient jusque-là dans une rivière. La teneur en arsenic supérieure au seuil réglementaire de 100 µg/l fixé en 2010, a rendu nécessaire la recherche d'une solution de dépollution. Sur la base d'études ayant montré la capacité de certaines bactéries présentes d'oxyder l'arsénite en arsénate, le BRGM a choisi de développer un procédé de traitement comportant



Vue aérienne des deux bassins décanteurs de la station de Lopérec. © BRGM

une étape d'oxydation biologique. Celui-ci repose sur deux réactions : l'oxydation bactérienne de l'arsénite et du fer ferreux, suivie de l'adsorption de l'arsénate sur les précipités de fer. L'influence du temps de séjour et de la teneur en oxygène dissous ont été étudiés, montrant qu'une heure était suffisante pour l'oxydation complète de l'arsénite contenu dans l'effluent (1 mg/l), pour une teneur en O₂ dissous proche de 2 mg/l. Les expériences de laboratoire ont aussi souligné le rôle crucial pour l'activité bactérienne des carbonates présents. Après une phase d'essais pilote, une station de traitement passif biologique en continu a été mise en service en 2017. Adaptée aux caractéristiques de l'eau, dont le débit maximal est de 60 m³/h, elle est composée de deux décanteurs et de deux biofiltres remplis de pouzzolane, milieu d'accueil des bactéries oxydantes et filtre des précipités de fer.

PUBLICATIONS | CONNAISSANCE ET MAÎTRISE DES PROCESSUS BIOGÉOCHIMIQUES



En flashant ce QR code, retrouvez quelques-unes des publications récentes du BRGM.