

Le voile se lève sur les bactéries fossiles

Des campagnes de fouilles successives sur le site de Franceville au Gabon depuis 2008 ont permis l'extraction de plus de 500 fossiles. Parmi cette formidable collecte se trouvent de spectaculaires fossiles de voiles bactériens, lieu de vie de micro-organismes vieux de milliards d'années.



Site fossilifère situé dans la région de Franceville

Les voiles bactériens ou biofilms, sont composés de nombreux et divers micro-organismes qui sont spatialement organisés. En géomicrobiologie, les biofilms sont des excellents enregistreurs de conditions paléo-environnementales. Les spécimens fossiles du Gabon ont prospéré il y a plus de deux milliards d'années sous une faible tranche d'eau.

La recherche de forme de vie primitive organisée sur Terre fait partie des prospections les plus intensives depuis quelques décennies. Cette vie ancestrale correspond aux microbialites, des roches organo-sédimentaires associant des voiles bactériens et de sédiments, prospérant il y a au moins 3,5 milliards d'années. Malgré son apparence primaire, un biofilm est l'un des modes de vie le plus répandu et abouti sur Terre. Les microbes sont capables de sécréter, en grande quantité, des substances polymériques extracellulaires correspondant principalement à des polysaccharides complexes, des protéines, des lipides et de l'ADN extracellulaire. L'ensemble de ces substances est considéré comme un mucus organique adhésif dans lequel les micro-organismes sont intégrés. Ce mucus permet aux bactéries d'être protégées contre les phénomènes extérieurs extrêmes. Il est surtout impliqué dans le développement et la croissance du voile bactérien. Ainsi, les biofilms acquièrent des propriétés que ne pourrait avoir une cellule bactérienne vivant isolée.

Les tapis microbiens fossiles découverts au Gabon par l'Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers (IC2MP – UMR 7285 CNRS / Université de Poitiers) font l'objet de plusieurs centres d'intérêts notamment pour l'étude des paléoenvironnements anciens de deux milliards d'années mais aussi sur les traces chimiques possibles laissées par le métabolisme cellulaire. Par ailleurs, ils ont été retrouvés dans la même localité où les premiers macro-organismes multi-cellulaires sur Terre furent observés, à Franceville. Cette découverte a permis de renforcer l'idée qu'un biota* a existé « tôt » dans l'histoire de la Terre.

" ...ces structures appelées cercles « farfelus »... "

UNE CROISSANCE RÉPÉTITIVE

Chez les géomicrobiologistes, il est important de comparer la morphologie des formes fossiles avec celle des formes actuelles afin de déterminer les bactéries impliquées. Les bactéries sont les premiers êtres vivants sur Terre, par conséquent dans l'histoire de l'évolution, elles sont restées très conservatrices dans leur façon de se développer. Le mode de croissance chez les microbes suit une règle simple : le coût énergétique doit être le plus faible possible. Majoritairement, leur développement est provoqué par des facteurs environnementaux externes aux bactéries c'est-à-dire une croissance successive, en direction de la lumière (vers le haut) ou en réponse à un apport de nutriments (mouve-

ments latéraux). Les photons et/ou les nutriments sont les ressources primordiales pour les réactions métaboliques afin de produire le composé organique commun à toutes les formes de vie : l'adénosine triphosphate ou ATP.

Quelques biofilms fossiles du Gabon montrent une exceptionnelle organisation concentrique. C'est cette même croissance bactérienne que l'on retrouve dans les marais salants, en France, en Inde et en Tunisie, par exemple. L'agencement en cercle reflète une réaction à un apport de petites bulles de gaz avec des nutriments venant du substrat. D'après des analyses génétiques par les microbiologistes ces structures appelées cercles « farfelus » sont uniquement réalisées par des cyanobactéries, des bactéries tirant leur énergie de la photosynthèse et capables de produire de l'oxygène. Ainsi, les chercheurs ont pu établir que certains voiles microbiens du Gabon étaient constitués de cyanobactéries prospérant dans des milieux calmes et sous une faible tranche d'eau. Ce type spécifique de bactérie a souvent été répandu depuis l'apparition de la vie sur Terre avec pour seule restriction écologique l'absence de lumière.

IDENTIFIER LES CRITÈRES BIOGÉNIQUES

Un des enjeux majeurs dans l'étude des voiles bactériens fossiles est de démontrer que les structures produites sont bien le résultat d'une activité biologique et non d'un artefact sédimentaire sans lien avec le vivant. Le parc analytique disponible dont la spectrométrie Raman a été utilisée pour déterminer la présence de carbone organique dans les tapis bactériens. Cette méthode, non destructive et rapide, est très sensible aux phases carbonées. Le carbone organique est un témoin clé de la présence de la vie, nécessaire au métabolisme de tous les êtres vivants.

Les voiles bactériens étudiés ont montré une excellente préservation des phases carbonées tandis que leur encaissant est dépourvu de carbone ce qui permet de les distinguer.

LE RÔLE MAJEUR DES TAPIS BACTÉRIENS DANS LA FOSSILISATION DE MACRO-ORGANISMES

On peut s'interroger sur le point de savoir comment des macro-organismes primitifs peuvent être aussi bien conservés tout au long des temps géologiques (plusieurs centaines de millions d'années). De manière récurrente, ces préservations montrent une association



Voile bactériens du Gabon avec une croissance concentrique.



Association des micro-organismes avec un macro-spécimen.

entre des tapis bactériens et des macro-fossiles. Cela a amené certains laboratoires spécialisés à réaliser de nombreuses cultures essayant de mettre en lumière les processus de fossilisation de petits animaux (mouches, poissons, grenouilles etc...) par les bactéries. Les résultats sont spectaculaires car les expériences menées sur plusieurs années, ont montré un retard de la dégradation des macro-organismes. En fait, les voiles bactériens intègrent dynamiquement les restes dégradés dans leurs cycles biochimiques et favorisent le processus de minéralisation des macro-organismes augmentant ainsi leur chance de préservation.

Ce processus de minéralisation a permis aux macro-fossiles du Gabon d'être conservés depuis plus de 2 milliards d'années, en partie grâce à l'intervention des bactéries sulfato-réductrices qui ont induit indirectement la minéralisation de cristaux de pyrite (FeS_2). Ce minéral se forme grâce à la réaction de minéraux ferrières détritiques avec le sulfure d'hydrogène (H_2S). L' H_2S quant à lui, est formé par la réduction des sulfates par les bactéries qui utilisent également la matière organique comme agent réducteur et de source d'énergie. De très nombreux cristaux micrométriques de pyrite ont ainsi remplacé les parties molles des spécimens préservant leurs formes et leurs tailles.

L'étude des tapis bactériens datés de plus de deux milliards d'années au Gabon est un projet multi-échelle et multidisciplinaire. Leur étude à l'échelle micrométrique pourrait permettre d'entrevoir les possibles interactions entre la partie organique et la partie minérale. La préservation d'un signal biologique vieux de deux milliards d'années au sein même des minéraux rendrait définitivement le Gabon, un chantier exceptionnel.

Jérémie AUBINEAU < IC2MP
jeremie.aubineau@univ-poitiers.fr
Abderrazzak EL ALBANI < IC2MP
abder.albani@univ-poitiers.fr
<http://ic2mp.labo.univ-poitiers.fr/>

* Un biota est une communauté d'organismes vivants, historiquement établie dans une région géographique particulière.

Échantillonner Mars, une ambition orléanaise !

Des étudiants, des lycéens et des chercheurs orléanais planchent actuellement sur l'instrument qui pourrait bouleverser les techniques d'analyse des roches martiennes *in situ*.

L'objectif des missions d'exploration à la surface des corps rocheux de notre système solaire est d'en étudier la géologie, d'y détecter des molécules organiques ou encore d'y chercher de potentielles traces de vie passée ou actuelle. Les roches (glaces incluses) constituent donc le matériel de base de beaucoup d'analyses. Sur Terre, cette démarche scientifique s'effectue en trois étapes : observations et interprétations sur le terrain, observation de fragments de roches et étude en lames minces. Les lames minces pétrographiques, c'est-à-dire des sections de roche de quelques centimètres de côté et d'une trentaine de micromètres d'épaisseur, servent à identifier les minéraux qui composent la roche par microscopie optique en lumière polarisée transmise (pétrographie). Cette identification se fait notamment à partir de la couleur apparente des minéraux en lumière polarisée/analysée. La technique, vieille de plus de 150 ans, permet dans la grande majorité des cas une caractérisation géologique complète d'un lieu donné. La lame mince constitue donc un objet de base de la géologie, d'autant plus que son intérêt ne se limite pas à la minéralogie. En effet, l'observation en lame mince permet également d'observer d'éventuels organismes fossiles et de faciliter grandement la réalisation d'analyses complémentaires par de nombreuses techniques (microscopie électronique et imagerie de spectroscopie Raman par exemple).

TOUT UN SAVOIR-FAIRE !

La fabrication d'une lame mince de roche se fait en plusieurs étapes. Tout d'abord, le morceau de roche est enrobé dans de la résine afin de lui donner la compétence nécessaire aux différentes phases de préparation. Le préparateur, appelé litholamelleur, découpe alors un parallélépipède (un sucre) dans le bloc qu'il vient ensuite coller à la surface d'une lame de verre. Le sucre est ensuite coupé parallèlement à son support en verre et seule une centaine de micromètres de roche

est conservée. Afin de diminuer encore l'épaisseur tout en conservant le parallélisme des faces, le litholamelleur utilise un disque abrasif. C'est la phase de rodage après laquelle il ne reste qu'une trentaine de microns d'épaisseur de roche à la surface de la lame de verre. Enfin, la surface est polie afin d'avoir un état de surface optimal pour les observations et les analyses. Durant toutes ces étapes, la dextérité et le savoir-faire du litholamelleur sont cruciales.

" Il n'existe à ce jour aucun système spatial de préparation de lames minces..."

VERS UNE PRÉPARATION AUTOMATISÉE POUR L'EXPLORATION PLANÉTAIRE

Conscient de la nécessité d'observer les roches en lames minces, un système semi-automatique a été développé dans les années 60 pour permettre aux astronautes des missions Apollo de préparer ce type d'échantillons à la surface de la Lune. Ce système tout-en-un nécessitait cependant l'intervention humaine entre les différentes étapes. Il n'a finalement pas été utilisé, la fabrication des lames étant plus facile sur Terre à partir des roches lunaires rapportées. Il n'existe à ce jour aucun système spatial de préparation de lames minces pétrographiques totalement automatisé pour l'exploration planétaire. L'automatisation du protocole de préparation reste difficile. Les limitations techniques imposées par la spatialisation d'un instrument, en termes de masse, de volume et d'énergie, sont très contraignantes.

UN PROJET COLLABORATIF ET INTERDISCIPLINAIRE

Et pourtant le défi est en passe d'être relevé par une équipe de scientifiques composée de géologues, physiciens, roboticiens, ingénieurs



Le groupe des 5 étudiants en charge du projet en plein travail au lycée Benjamin Franklin d'Orléans.

et techniciens issus de plusieurs laboratoires*, accompagnant des étudiants de l'école Polytech'Orléans et des élèves de BTS du Lycée Benjamin Franklin. Avec le soutien financier du CNES, elle s'est donc intéressée à l'automatisation complète de la préparation.

Mars constitue une cible de prédilection pour l'analyse en lames minces : grande variété géologique, présence possible de traces de vie fossile, relative facilité d'accès, conditions environnementales favorables. Dans un premier temps, le cahier des charges fonctionnel d'un tel instrument a été rédigé en concertation. Puis des tests de découpe, rodage et polissage en l'absence d'eau liquide ainsi que des mesures de consommations énergétiques ont été réalisés afin de vérifier la faisabilité de ces étapes lors d'une mission sur Mars. L'étude s'est ensuite poursuivie avec l'automatisation de la procédure à proprement parler et un protocole permettant de réaliser la préparation des lames a été proposé par les chercheurs. Au final, un système composé de trois disques superposés pouvant tourner indépendamment les uns des autres a été imaginé. Il permet de déplacer l'échantillon au travers des différentes étapes de préparation : enrobage, découpe, collage, rodage et polissage. Il pourra, du moins en théorie, transformer une carotte rocheuse centimétrique, similaire à celles qui seront réalisées sur Mars lors de la mission ExoMars 2020, en une lame mince pétrographique standard prête à être observée.

DE LA THÉORIE À LA PRATIQUE

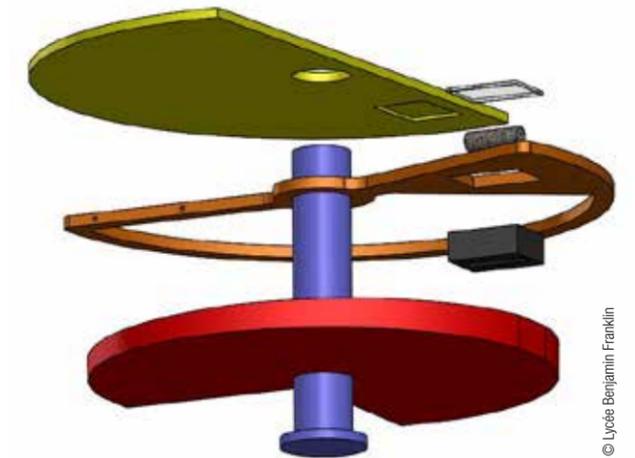
Entre la théorie et la pratique il y a souvent un monde ! À partir du schéma de principe, une importante période d'optimisation du protocole a donc eu lieu. Dans cette étape, l'équipe de chercheurs a reçu l'aide

De l'intérêt de la lame mince en géologie

L'étude pétrographique des roches en lames minces n'est pas nouvelle. Les premières lames ont été réalisées par William Nicol en 1831. L'idée est d'observer la microstructure de la roche (texture, minéraux, fossiles...) en transparence à l'aide d'un microscope optique. L'identification des minéraux par cette méthode sera améliorée par la suite par Auguste-Michel Lévy à la fin du XIX^{ème} siècle en utilisant les propriétés de polarisation de la lumière (charte de Michel Lévy, 1888). Cette méthode est très importante, des roches de compositions élémentaires identiques pouvant se différencier par la taille des cristaux qui les composent (basaltes et gabbros par exemple).

d'étudiants de Master 2 de l'école Polytech'Orléans se spécialisant en mécatronique et conception de système. Ils ont proposé des solutions techniques pour les étapes critiques de l'enrobage et de la motorisation des disques. Un modèle numérique 3D d'une maquette de démonstration a également été développé.

Afin de démontrer le fonctionnement de l'instrument, il a été décidé d'un commun accord entre tous les contributeurs de construire un modèle physique du système. Pour ce faire, les chercheurs ont alors appelé en renfort les enseignants du lycée Benjamin Franklin d'Orléans. Un groupe de 5 étudiants du BTS CPI (conception de produits industriels) a ainsi été désigné pour travailler toute l'année 2017-2018 sur le projet. Ils ont déjà avancé sur plusieurs fonctions dont le développement



© Lycée Benjamin Franklin

Prototype de système de préparation de lames minces automatisé. Modèle numérique en cours de développement par les étudiants du BTS CPI du lycée Benjamin Franklin d'Orléans.

d'un système pour enrober l'échantillon dans la résine et un autre pour emmener et stocker les supports en verre. Ils travaillent également à l'optimisation du système de plateaux tournants et peaufinent le modèle numérique 3D. La maquette physique devrait voir le jour dès 2018 afin d'être présentée aux différentes agences spatiales (ESA, CNES, NASA) en vue d'une possible spatialisation lors d'une prochaine mission. Mais le système développé pourrait également trouver des applications dans d'autres domaines scientifiques et industriels ou les lames minces sont utilisées (archéologie, matériaux...)

*Les chercheurs, ingénieurs et techniciens impliqués dans le projet sont issus du CNES, du Centre de Biophysique Moléculaire (CBM UPR CNRS 4301), de l'Institut des Sciences de la Terre (ISTO UMR 7327 CNRS/Université d'Orléans/BRGM), du laboratoire Pluridisciplinaire de Recherche Ingénierie des Systèmes, Mécanique, Énergétique (PRISME, UPRES 4229 Université d'Orléans), du Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace (LPC2E UMR 7328CNRS/Université d'Orléans), et du laboratoire Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation (CEMHTI UPR CNRS 3079).

Frédéric FOUCHER < CBM
frederic.foucher@cnrs-orleans.fr

Sylvain JANIEC < ISTO
sylvain.janiec@univ-orleans.fr

Aïcha FONTE & les étudiants < POLYTECH' ORLÉANS - PRISME
aicha.fonte@univ-orleans.fr

Les professeurs et étudiants du Lycée Benjamin Franklin
<http://cbm.cnrs-orleans.fr/>



Échantillons massifs et lames minces associées avec de gauche à droite du bois silicifié d'Arizona (200 millions d'années), un échantillon de la formation Draken, Svalbard (800 millions d'années), et un échantillon de la formation Gunflint, Canada (1,9 milliards d'années).

© Frédéric FOUCHER - CBM