

Une nouvelle bactérie championne de la biominéralisation

Certaines bactéries sont capables de former des phases minérales. Ceci a de nombreuses implications aussi bien pour les processus chimiques se déroulant à la surface de la Terre, la recherche de traces de vie passée, la synthèse de nouveaux matériaux ou bien le développement de procédés de dépollution. Cependant, on connaît encore mal la diversité de ces organismes biominéralisateurs. Des chercheurs du BIAM, de l'IMPMC, de l'IPGP, du synchrotron SOLEIL et de l'institut Pasteur ont étudié des sédiments et des échantillons d'eau du lac Pavin. Ils y ont découvert une nouvelle espèce bactérienne, championne de la biominéralisation puisqu'elle synthétise intracellulairement à la fois des nanocristaux de magnétite mais aussi de volumineux granules de carbonate de calcium amorphe. Son abondance et sa localisation dans la zone de transition oxygène-anoxique, pourrait conférer à cette bactérie un rôle géochimique particulièrement important et ignoré jusqu'ici.

Depuis plusieurs années déjà, un consortium scientifique travaille sur le lac Pavin situé à environ 50 km au sud de Clermont Ferrand. Ce lac de cratère de volcan est particulièrement intéressant puisqu'il reste stratifié en permanence. On parle de lac méromictique. Ainsi seule sa partie supérieure se mélange et s'oxygène au fil des saisons. En revanche, la partie la plus profonde de sa colonne d'eau (en dessous de 50 m de profondeur) reste entièrement anoxique en permanence et il existe un fort gradient de dioxygène (et d'autres espèces chimiques) à l'interface avec les eaux oxygènes sus-jacentes. Ces interfaces oxygènes-anoxiques que l'on retrouve aussi souvent à quelques millimètres ou centimètres de profondeur dans de nombreux sédiments suscite un grand intérêt de recherche puisque de nombreuses réactions chimiques s'y déroulent, très souvent catalysées par les microorganismes.

C'est en explorant ces interfaces oxygènes-anoxiques, à la fois dans les sédiments du bord du lac et en profondeur dans la colonne d'eau du lac Pavin que nous avons découvert une espèce bactérienne inconnue jusqu'alors. Initialement, nous ciblions un type particulier de bactéries : les bactéries magnétotactiques, c'est-à-dire des bactéries capables de nager en suivant les lignes du champ magnétique. Nous avons ainsi prélevé des échantillons puis placé un aimant contre le récipient pendant plusieurs heures. Ce temps écoulé, nous avons constaté qu'un agrégat visible à l'œil nu s'était formé au niveau de l'aimant. Après avoir prélevé cet agrégat, nous l'avons analysé de plusieurs manières. Dans un premier temps, des observations en microscopie optique ont permis de s'assurer de la présence de bactéries magnétotactiques dans cet agrégat. En effet, on observe les cellules tourner à 180° et nager dans la direction opposée à celle initiale lorsque l'on retourne un aimant placé à côté de la goutte d'eau regardée. Les analyses en microscopie électronique en transmission ont confirmé la présence de nanocristaux de magnétite alignés en chaînes, une caractéristique de ce type de bactéries.

Elles ont aussi montré qu'une grande partie de la cellule était occupée par deux globules composés d'une phase amorphe riche en calcium (Figure 1). L'analyse complémentaire par microscopie à balayage en transmission des rayons X générés par rayonnement synchrotron, a montré que cette phase est un carbonate de calcium amorphe (ACC ; Figure 2). Lorsqu'une cellule est sur le point de se diviser, elle forme deux petits globules d'ACC supplémentaires,

et juste après la division, chaque cellule fille contient un gros globule et un petit globule d'ACC, le gros globule, plus âgé, toujours du côté de la cellule où un flagelle est attaché. Enfin le couplage de la cryo-ultramicrotomie et de la cryo-microscopie électronique en transmission révèle que les globules d'ACC sont situés au niveau d'un compartiment intracellulaire délimité par une membrane lipidique.

Nous n'avons pas essayé d'isoler cette bactérie par une mise en culture mais il nous est quand même possible d'en apprendre un peu plus sur son identité grâce à la biologie moléculaire. Ainsi, l'ADN de ces bactéries a été extrait et le gène codant l'ARN de la petite unité des ribosomes (ADNr16S) a été séquencé. Sa séquence sert de véritable carte d'identité et a permis grâce à une comparaison avec les séquences des bactéries connues les plus proches de déterminer que cette bactérie magnétotactique appartient à la classe des Alphaproteobacteria. Les genres connus les plus proches phylogénétiquement sont *Azospirillum* (un ensemble de bactéries fixatrices de l'azote et vivant en association avec les racines de graminées) et *Skermanella* qui regroupe aussi un ensemble de bactéries des sols. Aucune bactérie de ces deux genres n'est pourtant connue pour être capable de former des magnétites ou des ACC, mais il est possible que cela soit passé inaperçu jusqu'ici. Enfin, une partie du génome de cette bactérie a aussi été séquencée. Elle contient notamment les gènes responsables de la formation des magnétites mais reste encore amplement à explorer.

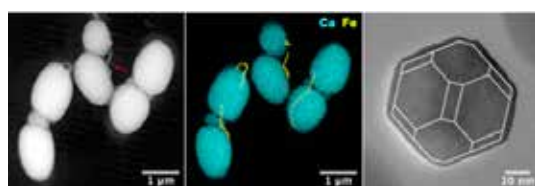


Figure 1

Analyses des bactéries magnétotactiques du lac Pavin formant des ACC intracellulaires par microscopie électronique en transmission. De gauche à droite : (i) image en STEM-HAADF de 3 cellules contenant chacune 2 grosses inclusions d'ACC et pour certaines deux petites. Une chaîne de magnétites est pointée par la flèche en rouge. (ii) Cartographie élémentaire par XEDS du calcium et du fer dans ces mêmes cellules. (iii) Image en MET haute résolution d'une magnétite composant la chaîne des magnétites des cellules; le modèle cristallographique superposé (traits blancs) met en évidence la morphologie cuboctaédrique du cristal.

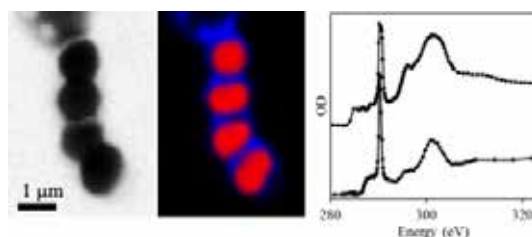


Figure 2

Analyses STXM au seuil K du carbone sur les inclusions intracellulaires des bactéries magnétotactiques du lac Pavin. De gauche à droite : image STXM prise à 320 eV; cartographie de deux composants spectraux différents : les inclusions d'ACC (rouge) et le reste de la cellule (bleu); spectre XANES au seuil K du carbone des inclusions d'ACC et d'un composé de référence synthétique d'ACC. L'axe des ordonnées montre la densité optique (OD). Les pics notés 1, 2 et 3 sont situés à 290.3, 296.2 and 301.6 eV.

Cette bactérie élargit la diversité phylogénétique des bactéries connues pour former des ACC intracellulaires. Jusqu'ici, on ne connaissait qu'une bactérie de la classe des Gammaproteobacteria, découverte il y a plus d'un siècle, et plusieurs espèces de cyanobactéries découvertes à l'IMPIC. On ne sait pas si toutes ces bactéries partagent des mécanismes évolutivement communs de formation des carbonates. Cette biominéralisation que l'on croyait rare il y a encore quelques années, s'avère beaucoup plus répandue dans les environnements naturels. Au lac Pavin, ces bactéries sont relativement abondantes au niveau des interfaces oxie-anoxie. De plus, elles forment ces phases de carbonate de calcium dans des eaux qui ne sont pas thermodynamiquement favorables à leur précipitation. Par conséquent, ces bactéries pourraient avoir un impact géochimique significatif pour les cycles du carbone et du calcium qu'il restera à quantifier.

Référence

"Intracellular amorphous Ca-carbonate and magnetite biomineralization by a magnetotactic bacterium affiliated to the Alphaproteobacteria"

Caroline L. Monteil, Karim Benzerara, Nicolas Menguy, Cécile C. Bidaud, Emmanuel Michot-Achdjian, Romain Bolzoni, François P. Mathon, Margot Coutaud, Béatrice Alonso, Camille Garau, Didier Jézéquel, Eric Viollier, Nicolas Ginet, Magali Floriani, Sufal Swaraj, Martin Sachse, Vincent Busigny, Elodie Duprat, François Guyot, Christopher T. Lefevre
ISME J 15, 1–18 (2021)

<https://doi.org/10.1038/s41396-020-00747-3>

Contacts

karim.benzerara(at)sorbonne.universite.fr, nicolas.menguy(at)sorbonne-universite.fr