

## Lumière sur les débuts de la vie

La question de savoir comment, où et quand la vie est apparue sur notre planète constitue l'une des interrogations les plus fondamentales de notre espèce. Pendant plus de la moitié de l'histoire terrestre, la vie s'est limitée à des formes microscopiques, parentes anciennes de nos bactéries actuelles. Si l'on réduisait à 365 jours les 4,6 milliards d'années écoulées depuis la formation de la Terre, les premières formes de vie, les microbes, seraient apparues au début du mois de mars. Les microorganismes seraient restés l'unique forme de vie jusqu'à la mi-août, lorsque les premiers organismes multicellulaires – initialement encore microscopiques – seraient apparus. La vie complexe avec coquilles et squelettes aurait commencé à se développer à la mi-novembre et les mammifères à la mi-décembre. L'extinction des dinosaures aurait eu lieu à Noël et les êtres humains ne seraient apparus que pour le réveillon à 23 h 25. Du fait de leur ancienneté et de leur diversité, il est donc fondamental d'étudier les fossiles microbiens pour comprendre l'apparition et l'évolution de la vie sur Terre et pour guider la recherche de possibles formes de vie extraterrestre. Le rover *Perseverance*, lancé par la NASA en août 2020 et qui a atteint Mars le 18 février dernier, a pour objectifs d'y rechercher des traces de fossiles microbiens et de vie existante et de sélectionner des roches qui seront envoyées sur Terre pour y être étudiées avec les méthodes les plus avancées.

La période géologique antérieure à 541 millions d'années est appelée le Précambrien. Les roches précambriennes abritent les plus anciens microorganismes fossiles de la Terre, qui peuvent remonter à plus de 3,4 milliards d'années [1-2]. Une bactérie est environ dix à cent fois plus petite qu'une cellule humaine. Ces formes microscopiques observées dans des roches ont été « cuites » à des températures supérieures à 100 °C, substituées par des minéraux et maintenues sous pression pendant des milliards d'années. Un obstacle majeur à leur étude est donc la difficulté à prouver leur *biogénicité*, c'est-à-dire leur origine biologique. D'importantes controverses scientifiques font débat depuis plusieurs décennies, comme celle concernant les structures vieilles d'environ 3,46 milliards d'années de la formation d'Apex Chert en Australie depuis 1993 [3-4].

### De nouvelles méthodes de rayons X

Les méthodes de spectroscopie et d'imagerie par rayons X reposent sur l'interaction d'un faisceau avec le cortège électronique des atomes de l'échantillon. Lorsque le signal de rayons X est détecté, seule l'intensité du champ électromagnétique peut être enregistrée et la phase du signal est perdue. Ce « problème des phases » rend impossible la résolution du problème inverse, qui permettrait de calculer directement la densité électronique. Afin de contourner ce problème, une famille entière de méthodes est en cours de développement : imagerie sans lentille, imagerie par diffraction cohérente, imagerie interférométrique, ptychographie. Ces méthodes reposent sur deux atouts majeurs : la production de faisceaux X de phase bien définie, dits « cohérents », à partir de sources de rayonnement de petite taille obtenues notamment sur grands instruments (synchrotrons, lasers à électrons libres), et la surdétermination du système d'équations à résoudre par superposition de données sur l'objet. Dans le cas de la ptychographie aux rayons X (du grec πτυχή, « pli »), c'est la collecte d'images sur des zones de l'échantillon se chevauchant partiellement qui apporte cette surdétermination et permet ainsi de reconstruire conjointement amplitudes et phases par itérations algorithmiques (figure 1). Il est ainsi possible d'en déduire les atténuations et les déphasages induits par l'échantillon à des résolutions spatiales nanométriques. Ce processus peut être répété en faisant tourner l'échantillon sous différents angles pour obtenir une reconstruction du volume 3D de l'objet, dite tomographie.

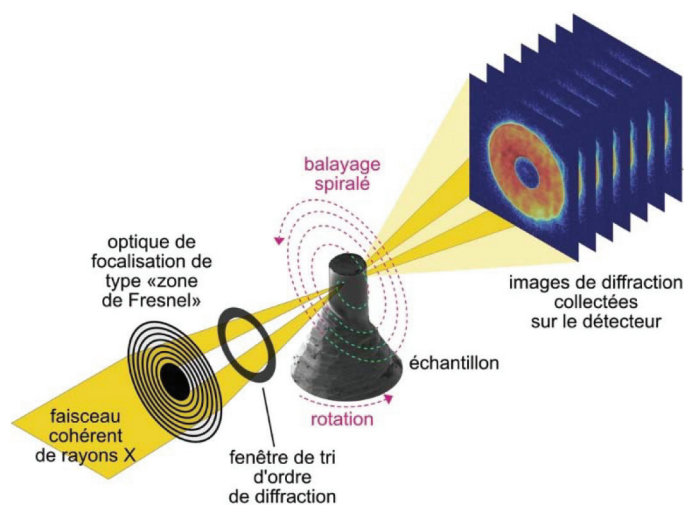


Figure 1 - Schéma de principe de l'imagerie par ptychographie 3D mise en œuvre sur la ligne de lumière cSAXS à la Swiss Light Source de l'Institut Paul Scherrer. Des images successives sont collectées (balayage spiralé), en veillant à ce que les domaines imagés se chevauchent. Ce processus est répété en faisant tourner l'échantillon selon un axe perpendiculaire au faisceau pour permettre une reconstruction 3D.

Cette approche a récemment été appliquée à des microfossiles vieux de 1,88 milliard d'années provenant de la formation de Gunflint en Ontario au Canada [5]. Ce site est emblématique de la fossilisation exceptionnelle et de la diversité des microbes préservés du Précambrien : il a donné la première preuve indubitable de la préservation de formes de vie microbiennes de cette période [6]. Des fossiles provenant de deux localités ont été étudiés : des microfossiles à paroi organique bien conservés de Schreiber Beach, et des structures substituées par des oxydes de fer bien moins préservées de Mink Mountain. Alors que les microfossiles à parois organiques sont difficiles à imager aux rayons X de par leur faible contraste avec la matrice rocheuse, les fossiles plus dégradés sont un exemple typique de structures dont la biogénicité est très difficile à évaluer. L'équipe a extrait des cylindres micrométriques de roche contenant des microfossiles par sonde ionique focalisée (figure 2b). Ces cylindres ont été scannés sur la ligne de lumière cSAXS du synchrotron *Swiss Light Source* entre Bâle et Zurich. L'imagerie ptychographique révèle des détails à l'échelle nanométrique des cellules fossiles et la distribution des différents minéraux et composés organiques du fossile et de la roche encaissante. Elle procure également un accès direct à la densité électronique des différents matériaux pour estimer leur densité, indice précieux pour identifier les différentes phases minérales et organiques des fossiles.

### Un mécanisme de fossilisation inconnu ?

Contrairement aux études précédentes qui indiquaient que les fossiles de Mink Mountain étaient entièrement substitués par de l'hématite (oxyde de fer,  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , de structure corindon), des masses compactes de kérogène fissuré, invisibles au microscope optique, sont observées au sein des fossiles (figure 2). Matière organique amorphe, le kérogène se forme à partir des composés organiques d'organismes vivants et précède la formation des combustibles fossiles ; la température atteinte durant la diagenèse conditionne sa composition et sa densité. La morphologie et la densité des kérogènes des fossiles de Mink Mountain sont typiques d'une température moyenne de maturation, comme anticipé pour ce site. La densité mesurée des cristaux d'oxyde de fer associés à la matière

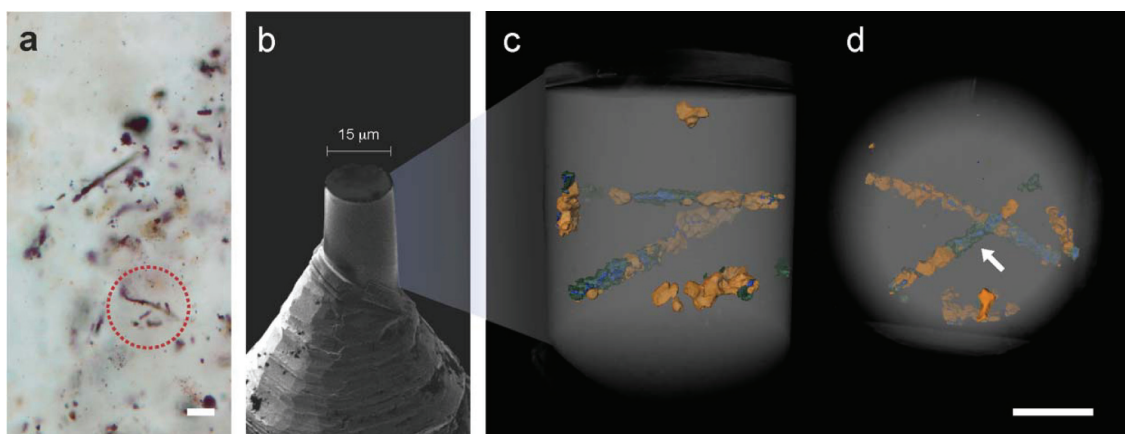


Figure 2 - Analyse de microfossiles du site de Mink Mountain. a) Image de microscopie optique montrant les fossiles sélectionnés pour l'analyse (cercle rouge). b) Pilier extrait de l'échantillon observé par microscopie électronique à balayage. c) Image 3D du même pilier observé en ptychographie et révélant les fossiles dans la roche. d) Vue de dessus de la reconstruction montrant les filaments fossiles montrés en (a). La flèche pointe vers la matière organique, indiscernable par microscopie optique (a).

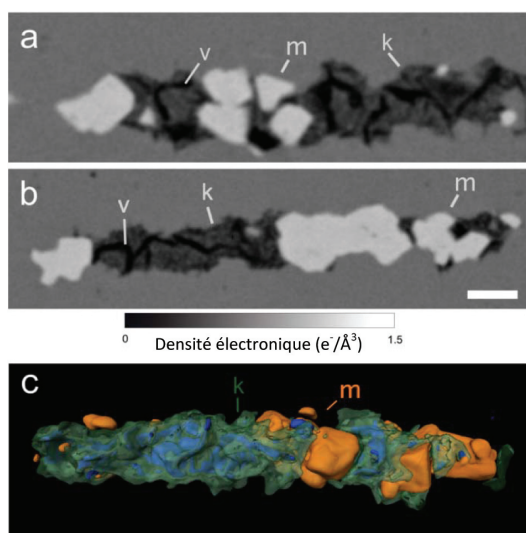


Figure 3 - Vue détaillée de microfossiles du site de Mink Mountain. a-b) Images tomographiques montrant le kérogène (k) avec des vides de maturation (v) associé à des cristaux de maghémite (m). c) Représentation des résultats en 3D.

organique est significativement inférieure à celle de l'hématite (figure 3). Elle est, par contre, très proche de celle de la maghémite, autre oxyde de fer de même formule chimique que l'hématite, dont le nom vient de la contraction de « magnétite » et « hématite ». La maghémite ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) possède une structure spinelle inverse très similaire à celle de la magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), mais de structure lacunaire : des sites en cation sont libres alors que structurellement, ils sont occupés dans la magnétite. Un processus inconnu de fossilisation est donc mis en évidence. Bien que l'hématite soit très répandue à grande échelle dans la roche, la présence et la maturation de la matière organique ont dû affecter la minéralogie du fer à l'échelle nanométrique, donnant naissance à de la maghémite, au lieu de l'hématite, dans les fossiles. La maghémite est un minéral métastable, rencontré comme intermédiaire réactionnel dans l'oxydation de la magnétite en hématite, rarement observé dans de tels contextes. Les microcristaux associés aux fossiles ont retenu des morphologies cubiques et octaédriques caractéristiques de l'habitus cristallin de la magnétite (on parle alors de pseudomorphisme), confirmant que ce minéral en était le précurseur. L'oxydation de la magnétite est due à la matière organique issue des cellules des microorganismes. Les températures de maturation atteintes, insuffisantes pour une

conversion complète en hématite observée dans d'autres localités de la formation Gunflint [7], ont entraîné la formation de maghémite à micro-échelle.

La compréhension fine des mécanismes de préservation des microorganismes et de leur composition chimique est nécessaire pour rechercher des formes de vie passées dans les plus vieilles roches de la Terre, et constitue un enjeu phare pour les communautés des matériaux anciens [8]. Une observation 2D seule peut conduire à des interprétations erronées : comme en radiographie, la superposition des structures imagées peut amener à une mauvaise interprétation des formes 3D. En outre, l'imagerie 2D ne permet pas de mesurer certaines caractéristiques morphométriques telles que le volume, l'épaisseur des enveloppes cellulaires ou la sphéricité, qui sont autant d'indices de biogénicité. Caractériser en détail la morphologie des fossiles en 3D au niveau infracellulaire apporte un atout essentiel pour étudier les structures controversées. L'estimation de la densité est clé pour identifier la nature chimique des phases et peut aussi être mise en œuvre avec des méthodes tomographiques classiques [9]. Le couplage de ces deux informations – morphologie 3D et densité – permet de confirmer la présence de matière organique – un caractère biogénique fondamental – et d'identifier les minéraux associés. Dans les prochaines décennies, avec le retour des échantillons de Mars sur Terre, savoir identifier sans équivoque un possible microbe fossile présent dans ces roches sans le détruire sera crucial. L'exploration de ces nouvelles méthodes à haute résolution et haute sensibilité pourrait se révéler fondamentale pour étudier des échantillons parmi les plus précieux de l'histoire de l'humanité.

La FAPESP (agence de financement de la recherche de l'État de São Paulo) a soutenu ce projet à travers les contrats 2015/21810-6 et 2016/25681-9.

[1] M.S. Dodd *et al.*, Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates, *Nature*, **2017**, *543*, p. 60-64.

[2] E.J. Javaux, Challenges in evidencing the earliest traces of life, *Nature*, **2019**, *572*, p. 451-60.

[3] J.W. Schopf *et al.*, SIMS analyses of the oldest known assemblage of microfossils document their taxon-correlated carbon isotope compositions, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **2018**, *115*, p. 53-58.

[4] M.D. Brasier, J. Antcliffe, M. Saunders, D. Wacey, Changing the picture of Earth's earliest fossils (3.5-1.9 Ga) with new approaches and new discoveries, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **2015**, *112*, p. 4859-64.

[5] L. Maldanis *et al.*, Nanoscale 3D quantitative imaging of 1.88 Ga Gunflint microfossils reveals novel insights into taphonomic and biogenic characters, *Sci. Rep.*, **2020**, *10*, 8163.

[6] E.S. Barghoorn, S.A. Tyler, Microorganisms from the Gunflint Chert, *Science*, **1965**, *147*, p. 563-75.

[7] R.S. Shapiro, K.O. Konhauser, Hematite-coated microfossils: primary ecological fingerprint or taphonomic oddity of the Paleoproterozoic?, *Geobiology*, **2015**, *13*, p. 209-24.

[8] Voir par exemple les travaux du DIM Matériaux anciens et patrimoniaux, réseau d'excellence en sciences du patrimoine ([www.dim-map.fr](http://www.dim-map.fr)).

[9] C. Reynaud *et al.*, In-place molecular preservation of cellulose in 5,000-year-old archaeological textiles, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **2020**, *117*, p. 19670-76.

Cette fiche a été réalisée par **Loïc BERTRAND**, physico-chimiste, chercheur à l'Université Paris-Saclay (PPSM, ENS Paris-Saclay/CNRS, [loic.bertrand@ens-paris-saclay.fr](mailto:loic.bertrand@ens-paris-saclay.fr)), et **Lara MALDANIS**, paléontologue, postdoctorante à l'Université Grenoble Alpes (ISTerre, CNRS/Univ. Savoie Mont Blanc/IRD/Univ. Grenoble Alpes, [lara.maldanis@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:lara.maldanis@univ-grenoble-alpes.fr)).

Les fiches « Un point sur » sont coordonnées par Jean-Pierre FOULON ([jp foulon@wanadoo.fr](mailto:jp foulon@wanadoo.fr)). Elles sont regroupées et en téléchargement libre sur [www.lactualitechimique.org/spip.php?rubrique11](http://www.lactualitechimique.org/spip.php?rubrique11).