

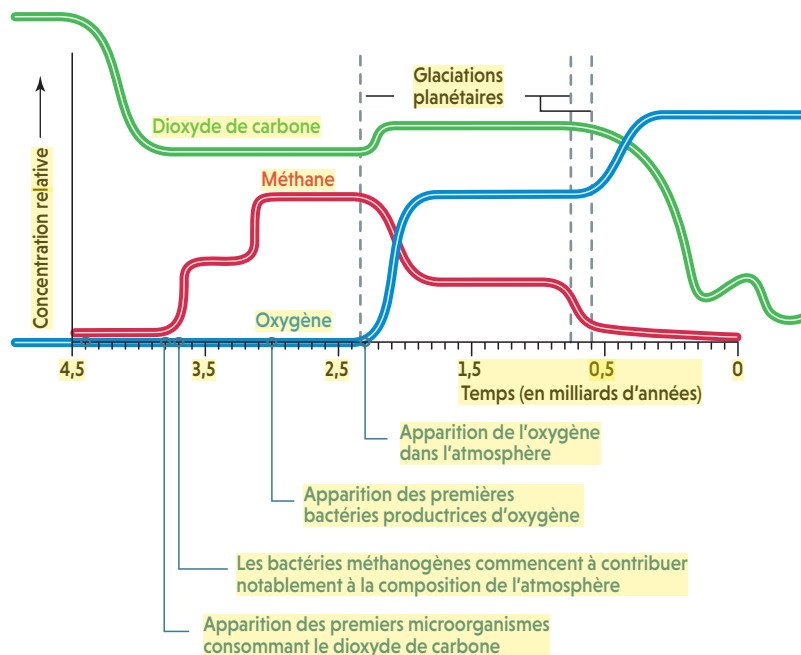
> matière de la surface vers l'océan en traversant de part en part la banquise.

Bien sûr, aucun vestige, même indirect, de ces structures n'a été conservé. Seule l'analogie avec les phénomènes observés sur l'actuelle cryosphère peut nous éclairer. Ainsi, la présence de suie sur la banquise et la fonte accélérée des glaces continentales donnent une idée des phénomènes et de leur potentielle importance. Ces observations suggèrent que les environnements formés grâce aux cryoconites ont pu héberger la vie durant les glaciations de type Terre boule de neige, mais pas à leur tout début : la formation de ces trous n'est possible que si le climat est suffisamment chaud. Dans les régions les plus froides actuellement comme le mont Howe, en Antarctique, culminant à 2350 mètres d'altitude, les poussières sont balayées par les vents et les particules sombres restent trop froides pour creuser des cryoconites. Ainsi, dans les premiers millions d'années de la glaciation, lorsque l'accumulation de CO₂ restait trop limitée, ni la formation de cryoconites ni la présence de glace salie et plus sombre à l'équateur ne semblent possibles. Comment les organismes photosynthétiques ont-ils survécu à ces premiers millions d'années ? La question reste entière...

LE RÈGNE DES ALGUES MARINES

Notre équipe et d'autres se concentrent sur la seconde grande question sur le vivant que soulève la Terre boule de neige. Le Cryogénien – la période qui comprend les deux glaciations de type Terre boule de neige du Néoproterozoïque et leur interlude – constitue une transition biologique majeure : le passage d'un monde unicellulaire microscopique à un monde constitué d'organismes pluricellulaires macroscopiques, les métazoaires. Il est incontestable qu'une telle période glaciaire a représenté une pression de sélection majeure pour les organismes biologiques. Nombre de lignées eucaryotes ont dû disparaître. Et pourtant, plusieurs études ont montré qu'au lendemain de la seconde glaciation, dite marinoenne, la vie a repris son cours de manière rapide et spectaculaire. Par exemple, en 2007, Marcel Elie, de l'université Henri-Poincaré, à Nancy, et ses collègues ont mis en évidence la prolifération d'algues rouges, un organisme pouvant être pluricellulaire, à partir de sédiments recouvrant directement les roches glaciaires. Par quels mécanismes le Cryogénien a-t-il pu favoriser la vie pluricellulaire ?

Diverses études ont révélé la présence de fragments de microfossiles dans les sédiments glaciaires, suggérant que la biodiversité n'était pas nulle durant les épisodes de Terre boule de neige et après. Mais cet enregistrement reste trop fragmentaire pour qu'on en déduise l'impact de ces épisodes sur l'évolution de la vie. De plus, seule la comparaison des sédiments avant et après ces glaciations permettra réellement de



caractériser cet impact. C'est pour cette raison que nous explorons le Grand Canyon et la vallée de la Mort. Notre groupe tente de comprendre ce qui s'est passé en entrée et en sortie de la glaciation marinoenne en étudiant le contenu chimique de roches datant de cette période. Les données recueillies apporteront des contraintes sur l'environnement où les sédiments glaciaires se sont déposés, que nous utiliserons dans nos modèles numériques du climat en laboratoire.

L'arrivée sur le site de la vallée de la Mort est spectaculaire. Les sédiments contiennent des *dropstones*, des blocs de roche libérés lors de la fonte d'un iceberg et qui, en tombant, ont déformé la matrice sédimentaire marine. Ces galets striés et facettés, anciennement interprétés comme des témoins du déluge, témoignent d'une activité glaciaire importante. Leur datation (635 millions d'années) et leur paléogéographie tropicale en font des témoins de la glaciation marinoenne. Les sédiments glaciaires qui les contiennent, nommés tillites, ont une épaisseur de plusieurs dizaines de mètres.

Nous prélevons des roches que nous comparerons avec d'autres échantillonnées sur le même site, mais antérieures à la glaciation. Elles rejoignent les sédiments pré et postglaciaires de cette même période que nous avons trouvés au Grand Canyon. Leur état de préservation exceptionnelle en fait de parfaits candidats pour y observer des traces de vie ancienne.

L'échantillonnage n'était cependant que la première partie du projet. Depuis, nous sommes revenus au laboratoire avec plus de 60 kilogrammes de roches et nous essayons, avec d'autres équipes, d'y détecter des traces physiques et chimiques de vie. Notamment, en 2017, avec Yosuke Hoshino, de l'institut

La Terre a connu deux grandes oxygénations depuis sa naissance, il y a 4,5 milliards d'années. La première, il y a entre 2,4 et 2,2 milliards d'années, liée à l'activité des premiers microorganismes photosynthétiques, est contemporaine de la première glaciation extrême. La seconde, il y a entre 1 milliard et 540 millions d'années, durant les glaciations extrêmes du Cryogénien, est contemporaine de l'apparition et de la diversification des métazoaires et autres organismes complexes.

Max-Planck de biogéochimie de Iéna, en Allemagne, et d'autres collègues, nous avons utilisé les sédiments échantillonnés au Grand Canyon et d'autres pour extraire des fossiles moléculaires nommés biomarqueurs.

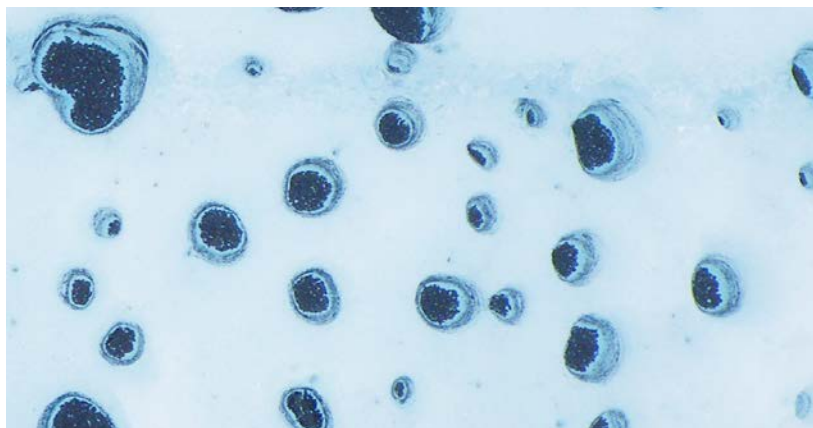
Cette technique repose sur le fait que différentes espèces synthétisent des molécules organiques qui leur sont propres et qui peuvent être préservées dans les sédiments pendant plusieurs millions d'années. Les molécules organiques extraites des divers sédiments ont permis de montrer que différents groupes d'algues existaient avant, pendant et après le Cryogénien. La technique a aussi révélé que la capacité des organismes à produire une molécule particulière, le 24-éthyl-stérol, est apparue durant cette période. Cette molécule est importante, car elle rend la membrane cellulaire plus résistante aux variations de température. Cette innovation biologique aurait donné aux algues vertes un avantage considérable, leur permettant de proliférer et de coloniser la surface de la planète.

En effet, la même année, dans une étude complémentaire fondée cette fois sur l'exploration de la diversité d'un groupe de lipides – les stéroïdes – dans les sédiments cryogénien, Jochen Brocks, de l'université nationale d'Australie, Yosuke Hoshino et leurs collègues ont montré que juste avant le Cryogénien, le monde était dominé par des producteurs de stéroïdes primaires de type cyanobactéries, puis que les algues marines planctoniques les avaient « vite » supplantés durant l'interlude entre les deux glaciations. La pression de sélection que ces glaciations ont imposée au monde vivant se révèle ainsi avoir été un véritable stimulus évolutif qui a mené à l'émergence de la famille des algues vertes.

COUP DE POUCE DE BACTÉRIES

Un autre stimulus a pu jouer un grand rôle dans l'émergence de la vie pluricellulaire: une oxygénation massive de l'atmosphère, qui lui aurait permis d'atteindre une concentration proche de l'actuelle. Ce sont cette fois des échantillons de la fin de la glaciation marinoenne prélevés en 2010 au Mato Grosso, au Brésil, qui nous ont permis, en 2016, d'apporter cette seconde brique dans l'histoire de la vie. Nous avons mis en évidence le rôle de bactéries exploitant le soufre dans cette oxygénation massive.

L'oxygénation de l'atmosphère s'est déroulée sur deux périodes: la première, il y a entre 2,4 et 2,2 milliards d'années, est attribuée (en partie) à la photosynthèse. La seconde, comprise entre 1 milliard et 540 millions d'années, restait inexpiquée. En analysant les composés soufrés dans les sédiments, nous nous sommes aperçus qu'ils étaient très abondants, ce qui suggérait une activité intense de bactéries qui utilisent ces composés comme oxydant dans une respiration anaérobie (sans oxygène). Nous avons estimé que ces bactéries auraient été responsables d'une



Des cryoconites, des trous de quelques dizaines de centimètres que l'on observe dans la banquise arctique et antarctique, comme ici au Groenland, ont pu héberger la vie durant les glaciations du Cryogénien.

baisse de 50% des sulfates dissous dans l'océan. Ces bactéries auraient ainsi « épargné » l'oxygène produit par les organismes photosynthétiques. Ce mécanisme, couplé à l'essor des algues, aurait permis d'accumuler une quantité suffisante d'oxygène libre pour soutenir énergétiquement des formes de vie multicellulaires.

Bon nombre de mystères restent à résoudre concernant ces épisodes de Terre boule de neige. Notamment, peu de modèles numériques expliquent une sortie de glaciation sans invoquer une accumulation extrême de CO₂ dans l'atmosphère, en désaccord avec les données géochimiques obtenues. Certains chercheurs s'orientent donc vers d'autres explications, comme la libération du méthane piégé sous la glace des continents lors de ses fracturations.

Notre équipe poursuit sa quête d'échantillons. Nous revenons récemment de Suède où des sédiments cryogénien très bien préservés affluent. Nous espérons y identifier la biomasse produite durant la glaciation et comparer son signal chimique à celui des cryoconites antarctiques actuelles, mais aussi estimer l'impact de la colonisation post-Terre boule de neige sur le cycle global du carbone.

On nous demande souvent si la Terre subira une autre glaciation globale. La conjonction des facteurs qui l'ont permise au Néoprotérozoïque était assez exceptionnelle: des continents tous en position tropicale, ce qui favorisait leur altération, et donc le piégeage du CO₂. Aujourd'hui, ces conditions ne sont pas réunies, mais même réunies, elles ne permettraient sans doute plus l'entrée en glaciation. En effet, le Soleil est plus vieux de 700 millions d'années et sa puissance a augmenté. La principale conséquence est qu'il faudrait une concentration quasi nulle en CO₂ dans l'atmosphère pour que la Terre se couvre de nouveau de glace. Plus le Soleil vieillira, plus il sera donc difficile d'enclencher le processus. On note toutefois que dans les années 1960, les travaux de Mikhaïl Budyko se fondaient sur un scénario anthropique, celui d'un hiver nucléaire lié à un affrontement ouvert entre les blocs de l'Est et de l'Ouest. Ce scénario reste d'actualité... ■

BIBLIOGRAPHIE

P. F. Hoffman et al., **Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology**, *Science Advances*, vol. 3(11), e1600983, 2017.

Y. Hoshino et al., **Cryogenian evolution of stigmastereoid biosynthesis**, *Science Advances*, vol. 3(9), e1700887, 2017.

J. J. Brocks et al., **The rise of algae in Cryogenian oceans and the emergence of animals**, *Nature*, vol. 548, pp. 578-581, 2017.

P. F. Hoffman, **Cryoconite pans on Snowball Earth: Supraglacial oases for Cryogenian eukaryotes?**, *Geobiology*, vol. 14(6), pp. 531-542, 2016.

P. Sansjofre et al., **Multiple sulfur isotope evidence for massive oceanic sulfate depletion in the aftermath of Snowball Earth**, *Nature Communications*, vol. 7, 12192, 2016.

P. Hoffman, **Quand la Terre était gelée**, *Pour la Science*, n° 268, pp. 30-37, fév. 2000.