

Les microbes produisent la moitié du méthane et les deux tiers du N_2O dus à l'humanité

extinction massive des espèces du fond des océans, et dans une moindre mesure de celles de leur surface.

Ces événements sont associés à une particularité : le carbone des calcaires qui se déposent alors est très appauvri en un isotope, le carbone 13 (^{13}C), ce qui met sur la piste d'un possible rôle du méthane. En effet, le CH_4 d'origine microbienne est très pauvre en ^{13}C : un relargage soudain de CH_4 , suivi de son oxydation en CO_2 dans l'atmosphère ou dans les océans, conduit à des dépôts calcaires anormalement appauvris en ^{13}C . L'oxydation du CH_4 dans les océans contribua à réduire la quantité d' O_2 , expliquant l'anoxie des océans et la préservation consécutive de la matière organique à l'origine du pétrole. Cependant, une fraction du CH_4 s'échappa et réchauffa l'atmosphère. D'où venait-il ?

Le CH_4 est en permanence produit de manière chimique et, à 90 %, biologique dans les roches profondes et les sédiments, dépourvus d'oxygène. Gaz peu dense, il fait son chemin vers le plancher océanique où la pression de la colonne d'eau et des sédiments ainsi que la basse température (4°C) de l'eau provoquent la formation de clathrates, des édifices moléculaires où le CH_4 est piégé dans de la glace d'eau. Actuellement, de gigantesques réserves de clathrates sont prisonnières dans les sédiments. Mais si la pression baisse, suite par exemple à une baisse du niveau marin, ou si la température augmente, consécutivement par exemple à une modification de la circulation des eaux profondes de l'océan après un début de réchauffement, les clathrates se déstabilisent et libèrent le CH_4 . De tels relargages ont contribué sinon à déclencher, du moins à amplifier les EAO. Et aujourd'hui, à l'heure où l'effet de serre anthropique réchauffe les

océans, la bombe à retardement des clathrates inquiète beaucoup...

Durant les EAO, les extinctions liées au changement climatique et à l'anoxie des fonds océaniques sont parfois renforcées par un autre effet également lié... à des bactéries. Les fonds océaniques anoxiques sont en effet pleins de matière organique et de méthane, non utilisés par des organismes respirant avec de l'oxygène, car celui-ci y est en quantité insuffisante. Par contre, des bactéries, dites « sulfatoréductrices », respirent en remplaçant l'oxygène par les sulfates qui sont alors transformés en H_2S , un gaz à l'odeur d'œuf pourri et surtout très toxique. C'est ce qui se passe lorsque les algues des marées vertes s'accumulent sur nos côtes. À plus grande échelle, cela a probablement contribué aux extinctions d'espèces.

UNE BIOSPHÈRE PLUS PROFONDE QUE PRÉVU

Archées et bactéries règnent aussi dans les entrailles de la Terre, comme le suggère le CH_4 profond d'origine biologique. En fait, les roches sont loin d'être biologiquement inertes, comme en attestent les forages ou les expériences tentant d'injecter du CO_2 dans les premiers kilomètres de la croûte terrestre pour contrer l'augmentation des teneurs atmosphériques. Les basaltes sont appropriés dans cette perspective, car le CO_2 y est piégé en formant des carbonates solides avec le fer et le calcium présents. Mais des colmatages inattendus des pores censés accueillir ce gaz sont fréquents, comme récemment sur le site islandais d'Helisheidi où des injections expérimentales ont eu lieu entre 500 à 800 mètres de profondeur. Les communautés bactériennes réagissent à la présence de CO_2 et d' H_2S dans les fluides

injectés et aux nutriments, comme le fer, libérés par le basalte. L'équipe de Bénédicte Ménez et d'Emmanuelle Gérard, de l'Institut de physique du globe de Paris, a démontré que des espèces bactériennes sont défavorisées par ce changement de conditions tandis que d'autres, utilisant par exemple le CO₂ ou oxydant le fer ou les sulfures, prolifèrent et colmatent parfois les pores de la roche.

Les forages et les mines repèrent la présence de vie jusqu'à 2,5 kilomètres de profondeur sous les océans et 5 kilomètres sous la surface des continents ! Tant qu'il y a de l'eau et que la température ne dépasse pas 121 °C, la vie est là : les bactéries et les archées vivent lentement, au gré de la circulation des eaux souterraines et de réactions chimiques autorisées par leurs interactions avec la roche. Par exemple, certaines vivent en attaquant le fer ferreux des minéraux, d'autres utilisent du dihydrogène (H₂) produit lors des interactions eau-roche et le font réagir avec du CO₂ pour produire leur énergie et du méthane comme déchet. Même si leur quantité est limitée à une à dix tonnes de microbes par kilomètre cube de roches, l'énorme volume du sous-sol poreux et fracturé renfermerait... plus de 70 % des microbes terrestres.

la fabrication du nitrate ou encore sa transformation en N₂O sont microbiennes. Plus généralement, la majeure partie de l'azote présent dans la matière organique a été, à un moment ou un autre, extraite de l'atmosphère par des bactéries dites « fixatrices d'azote ». On pourrait multiplier les exemples avec les cycles des métaux, comme le fer, ou celui du soufre.

Ouvriers invisibles du monde que nous habitons, les microbes sont et font le monde. Imaginons qu'un coup de baguette magique efface tout (êtres vivants macroscopiques, animaux et plantes, et la matière minérale) de la Terre entière à l'exception des microbes, il resterait, vu l'abondance de ces derniers dans les sols, les roches ou la surface de l'océan, une sorte de boule. Un observateur peu attentif vivant sur la Lune prendrait toujours ce qui reste pour la Terre grâce à la lumière renvoyée par ces milliards de milliards de microbes... L'invisible rendrait la Terre visible !

UN HOLD-UP ?

Ainsi notre sous-sol, notre atmosphère et notre climat sont-ils profondément influencés par les microbes. C'est moins un hold-up que l'effet du temps, car la vie microbienne a existé bien avant les organismes pluricellulaires et macroscopiques, comme les animaux. Ceux-ci se sont adaptés au monde déjà façonné, déjà « terraformé » par les microbes. Souvent, leur évolution a utilisé ces invisibles, non seulement avec les chloroplastes et les mitochondries de leurs cellules, mais aussi avec les microbiotes qui les habitent et les aident à fonctionner.

Les bactéries jouent avec la chimie de notre environnement grâce à la diversité de leurs métabolismes. Elles contribuent grandement aux formes dans lesquelles se trouvent les éléments chimiques, en réalisant des conversions entre ces formes qui s'organisent en cycles. Pour le cycle du carbone, nous avons vu que les bactéries, libres ou intracellulaires, expliquent les échanges entre carbone minéral et carbone organique. Mais les autres cycles sont aussi dominés par les bactéries. Dans celui de l'azote,

— Les auteurs —

> Marc-André Selosse

est professeur du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, et aux universités de Gdansk, en Pologne, et de Kunming, en Chine.

> Pierre Thomas

est professeur émérite à l'École normale supérieure de Lyon.

> Bénédicte Ménez

est professeuse de l'université de Paris à l'Institut de physique du globe de Paris.

— À lire —

> E. Mlewski et al.,

Characterization of pustular mats and related *Rivularia*-rich laminations in oncoids from the Laguna Negra lake (Argentina), *Front. Microbiol.*, vol. 9, art. 996, 2018.

> M.-A. Selosse, *Jamais seul.*

Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations, Actes Sud, 2017.

> B. Ménez, La vie intraterrestre : les microbes de la cité perdue, in C. Jessus (Ed.), *Étonnant Vivant. Découvertes et promesses du XXI^e siècle*, CNRS Éditions, pp. 57-64, 2017

> P. Ward, Un impact venu des profondeurs, *Pour la Science*, n° 349, pp. 40-45, 2006.