

> Ces microbes, qui résident sous le lit microbien blanc et les éclats de coquilles de palourdes, consomment du méthane avec une incroyable voracité. Quoique minuscules pris séparément, ils forment d'impressionnantes colonies, capables de modeler des paysages, de réguler des écosystèmes et de modifier le climat de la planète. D'où leur vient ce pouvoir? De leur faculté à coopérer. Les scientifiques connaissent ces microorganismes depuis des décennies. Pourtant, ils restent nimbés de mystère sur de nombreux aspects. Une des principales inconnues à leur sujet est l'étendue de leur influence: occupent-ils seulement des niches du plancher océanique ou sont-ils ubiquitaires? Plus généralement, leur tendance à la coopération est-elle exceptionnelle dans le monde des microbes ou banale? On a longtemps pensé que ces organismes se disputaient les ressources. Et si la coopération était leur mode de fonctionnement par défaut? Nous étions là – un faisceau de lumière suspendu dans les profondeurs noires – pour déterminer à quel point l'esprit d'équipe régnait ici-bas.

DES MICROBES INSAISSISSABLES

En un sens, notre voyage pour recueillir des organismes microscopiques dans les grands fonds constituait le prolongement des recherches visant à comprendre comment la Terre fonctionne – comment les éléments tels le carbone, l'azote, le soufre et le phosphore migrent entre les écosystèmes et comment les gaz à effet de serre se retrouvent dans l'atmosphère. Après tout, nous vivons dans un monde microbien: de l'intérieur de la croûte océanique jusqu'aux poussières des déserts en suspension dans l'atmosphère, on détecte des microbes presque partout où nous regardons. Et les scientifiques savent depuis longtemps que ces microorganismes jouent un rôle dans la répartition des éléments cités plus haut et qu'ils ont participé à façonner le visage de la Terre.

Mais l'approche qu'ont suivie les chercheurs pour étudier le monde microbien a limité leur compréhension de ces mécanismes globaux. Pendant des décennies, ils se sont concentrés sur des espèces prises individuellement et sur leurs composants moléculaires. Parmi les masses de microbes entre les grains de sable, ils ont isolé quelques organismes dont ils ont exploré la biochimie et le rôle des gènes. Cette approche a livré quantité d'informations sur ces espèces, ainsi que sur la façon dont les cellules et les biomolécules fonctionnent en général. Mais lorsque les chercheurs ont ensuite pris du recul pour comprendre la biosphère dans son ensemble, d'importantes lacunes subsistaient dans leur édifice théorique. Ils n'avaient réussi à isoler qu'une infime fraction des microbes observés dans la nature, ce qui suggérait que les espèces composant les

communautés bactériennes complexes étaient étroitement liées, d'une façon impossible à répliquer en laboratoire. De plus, la coexistence de nombreuses espèces prospères, jouant souvent des rôles complémentaires, semblait contredire l'idée selon laquelle une lutte acharnée pour les ressources régissait les écosystèmes microbiens.

En outre, les mesures de l'activité métabolique d'une espèce (sa vitesse de production d'oxygène ou de consommation d'azote, par exemple) en laboratoire correspondaient rarement aux valeurs observées dans le monde réel, car les organismes que les scientifiques réussissent à isoler sont souvent plus vigoureux que ceux qui ne se laissent pas prendre. Autrement dit, le tout était parfois supérieur, parfois inférieur, mais jamais égal à la somme des parties.

DANS LE TUBE D'ALVIN

Mais aujourd'hui, un nombre croissant de preuves suggèrent que les interactions microbiennes jouent un rôle central dans la vie de ces écosystèmes et expliqueraient nombre d'observations. Au cours des dix dernières années, les progrès du séquençage et de l'imagerie, entre autres, ont permis aux chercheurs d'étudier des communautés microbiennes comme un tout. Les dernières découvertes indiquent que la collaboration est un moteur



Un microbe se nourrissait de méthane, l'autre respirait du sulfate

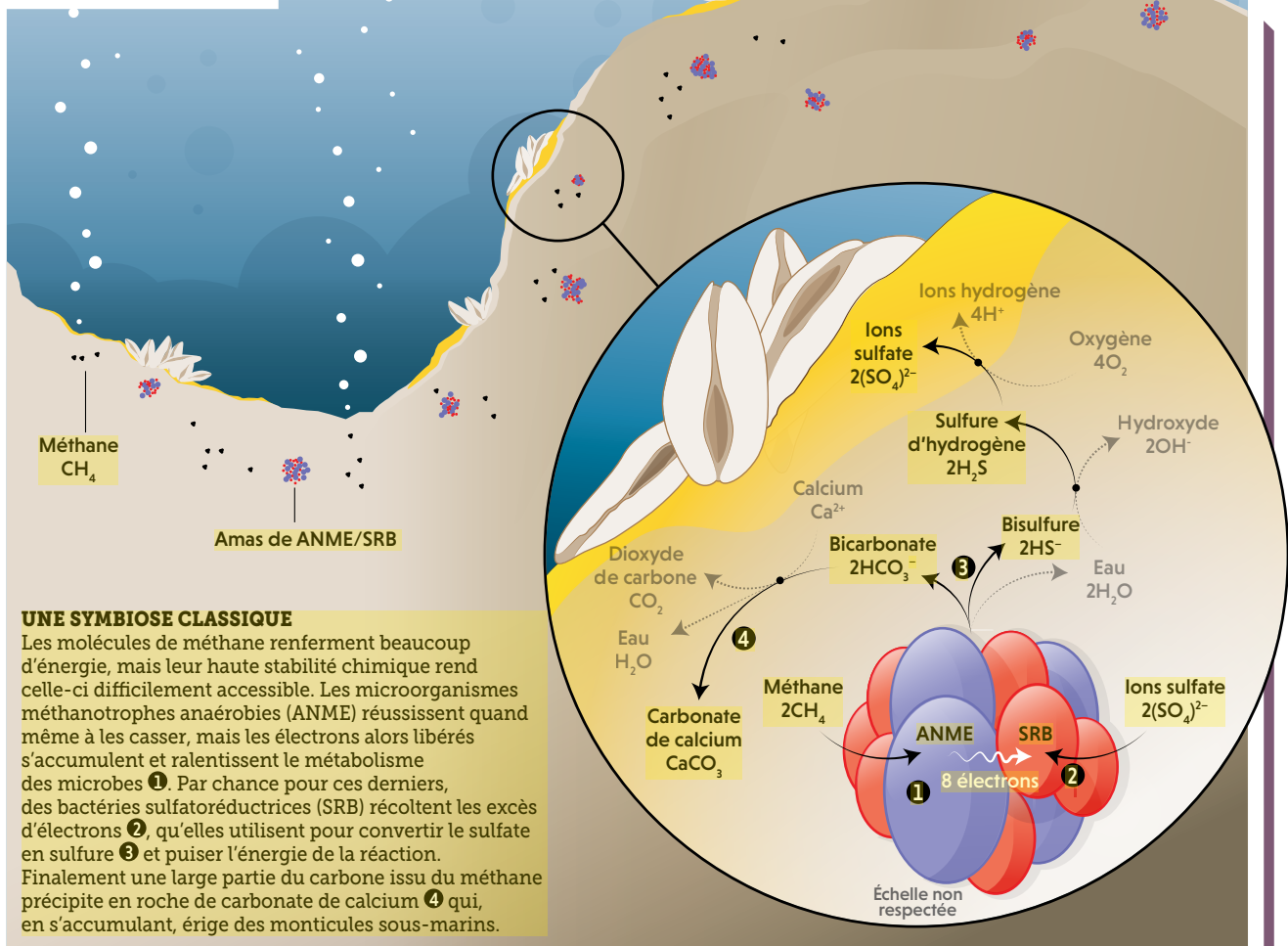


essentiel de la biosphère et de son évolution: en partageant énergie, information génétique et fonctions métaboliques avec leurs voisins, les microbes s'ouvrent à de nouveaux modes de vie et deviennent capables de coloniser des habitats jusque-là inhospitaliers.

À Hydrate Ridge, le bras robotique d'*Alvin* plonge un tube en plastique dans un tapis microbien à l'aspect de mousse. Le tube s'enfonce facilement, mais rencontre soudain une résistance et un choc se propage jusqu'au sous-marin. Finalement, le bras perce la couche rebelle et recueille un échantillon qui laisse un mince panache de poussière sédimentaire derrière lui

LE MYSTÈRE DES MOLECULES MANQUANTES

Une partie du méthane et du sulfate produits dans les fonds marins s'évanouit à l'intérieur des couches de sédiments et des roches calcaires du plancher océanique. Les scientifiques ont longtemps soupçonné qu'un microbe était responsable de leur disparition, mais sans parvenir à identifier d'espèce capable de consommer les deux molécules. Finalement, ils se sont rendu compte qu'il s'agissait non pas de un, mais deux types de microbes travaillant de concert.



UNE SYMBIOSE CLASSIQUE

Les molécules de méthane renferment beaucoup d'énergie, mais leur haute stabilité chimique rend celle-ci difficilement accessible. Les microorganismes méthanotrophes anaérobies (ANME) réussissent quand même à les casser, mais les électrons alors libérés s'accumulent et ralentissent le métabolisme des microbes ①. Par chance pour ces derniers, des bactéries sulfatoréductrices (SRB) récoltent les excès d'électrons ②, qu'elles utilisent pour convertir le sulfate en sulfure ③ et puiser l'énergie de la réaction. Finalement une large partie du carbone issu du méthane précipite en roche de carbonate de calcium ④ qui, en s'accumulant, érige des monticules sous-marins.

tandis que Jeffrey Marlow et ses collègues le guident jusqu'à un étui collé au fuselage.

Plus tard dans l'après-midi, dans le vaste laboratoire du navire, l'équipe examine la coupe transversale d'une trentaine de centimètres récupérée. Sous le tapis blanc, la boue beige se transforme en une matière poisseuse truffée de cailloux – la croûte qui a brièvement résisté à nos efforts – pour finalement se réduire à un mélange gris foncé. Le réservoir microbien que nous chassons se trouve dans la couche la plus sombre, qui empest l'œuf pourri. Des travaux menés dans les années 1980 avaient montré que c'était là, dans ces colonies bactériennes des fonds marins, que le méthane produit plus en profondeur dans la roche et le sulfate provenant

de l'eau de mer environnante disparaissaient tous deux des sédiments. Mais les tentatives d'identifier une ou plusieurs espèces microbiennes consommant à la fois du méthane et du sulfate étaient restées vaines. Adoptant une autre approche, des chercheurs ont alors utilisé en laboratoire du méthane et du sulfate comme appâts. Ils ont ainsi montré, au début des années 2000, qu'il n'y avait pas un, mais des coupables: des amas cellulaires de deux types de microbes caractérisés par des activités métaboliques distinctes. L'un se nourrissait de méthane, l'autre respirait du sulfate.

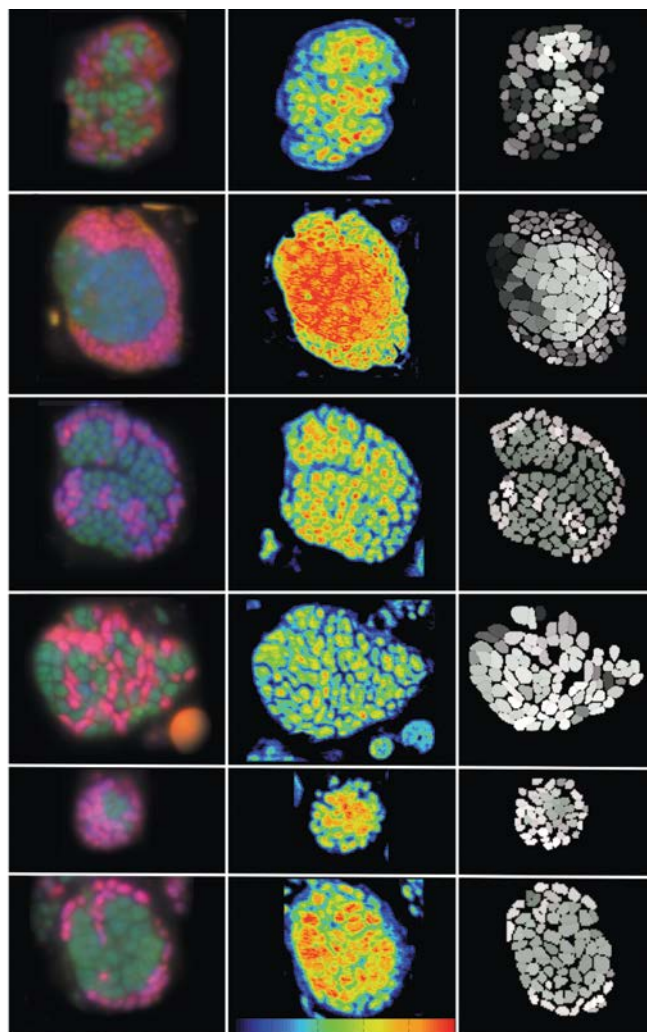
Ce mécanisme – l'oxydation anaérobie du méthane, c'est-à-dire en l'absence d'oxygène – serait impossible sans cet appariement entre

organismes méthanotrophes (qui consomment du méthane) anaérobies et bactéries sulfatoréductrices. Le méthane est une molécule de haute énergie, mais très stable: il est difficile pour une cellule d'en casser un exemplaire, et ainsi de libérer des électrons et d'alimenter son métabolisme en énergie. Les organismes méthanotrophes anaérobies peuvent s'acquitter de cette tâche, mais en contrepartie produisent une surabondance d'électrons, dont l'accumulation devrait en temps normal interrompre leur métabolisme. Toutefois, les déchets d'un microbe sont parfois un trésor pour d'autres: les bactéries sulfatoréductrices utilisent l'excès d'électrons pour transformer les sulfates en sulfure (ce qui confère au sédiment son odeur putride) et exploitent l'énergie produite lors de la réaction. C'est une symbiose classique: les organismes méthanotrophes anaérobies bénéficient d'un service rapide de collecte des ordures, et les bactéries sulfatoréductrices profitent du raccordement au réseau électrique.

Notre expédition à Hydrate Ridge a montré que la consommation symbiotique de méthane se produisait non seulement dans les sédiments, où le phénomène avait été découvert, mais aussi à l'intérieur des roches carbonatées qui forment d'énormes monticules autour du méthane. En fait, s'il arrive que l'interaction des organismes méthanotrophes anaérobies et des bactéries sulfatoréductrices se produise à l'échelle microscopique, des recherches dans la mer Noire, le golfe du Mexique et d'autres lieux ont montré que le processus est omniprésent. Il absorbe environ 80% du méthane sortant du fond marin et construit des reliefs carbonatés sur de grandes échelles.

DES MICROBES COMPLÉMENTAIRES

Les eaux profondes – qu'elles soient marines ou continentales – regorgent d'exemples d'interactions microbiennes, et les séquences d'ADN obtenues ces dernières années à partir de cellules microbiennes dans des eaux souterraines et des sédiments océaniques révèlent à quel point ces communautés sont réellement interconnectées. À mesure qu'a augmenté le nombre de séquences d'ADN échantillonnées, deux conclusions étonnantes se sont imposées. Premièrement, les bactéries et les archées (le troisième grand domaine du vivant aux côtés des bactéries et des eucaryotes, les organismes constitués de cellules à noyaux) sont bien plus diversifiées qu'on ne l'imaginait – le nombre de branches de l'arbre de la vie a explosé. Mais peut-être encore plus surprenant, leurs génomes sont ridiculement petits: beaucoup ne disposent pas de toute l'information génétique nécessaire pour construire une cellule fonctionnelle ou pour



UNE COLLABORATION DE PROXIMITÉ

Dans les fonds océaniques, des archées méthanotrophes anaérobies (à gauche en vert) et des bactéries sulfatoréductrices (en rose) vivent associées au sein de petits agrégats, ici observés par diverses techniques d'imagerie.

amener à son terme la conversion des nutriments en énergie. «Ce que nous constatons systématiquement lorsque nous explorons de nouveaux environnements, déclare Laura Hug, professeure de microbiologie environnementale à l'université de Waterloo, au Canada, et membre d'une équipe ayant découvert un certain nombre de nouvelles espèces microbiennes, c'est que la communauté dans son ensemble a la capacité de remplir une certaine fonction, comme le recyclage de l'azote. Toutes les pièces sont présentes. En revanche, identifier un seul organisme qui présente toutes les pièces dans son propre génome, cela n'arrive quasiment jamais.»

Le génome des cellules récemment découvertes est souvent incapable de produire toute la palette des constituants de l'ADN (les nucléotides) et des protéines (les acides aminés). Probablement acquièrent-elles ces

constituants auprès des cellules voisines qui ont des excédents. Ces communautés semblent également extraire l'énergie de l'environnement grâce à un processus collectif: des cellules effectuent certaines conversions chimiques, puis, en aval, d'autres lancent de nouvelles réactions avec le produit obtenu. Ce partage de constituants cellulaires et de ressources énergétiques à la fois requiert et permet la cohabitation de divers organismes.

Bien que des cellules proches parentes et à proximité luttent pour acquérir les mêmes ressources, la moisson récente d'informations génétiques suggère qu'à plus grande échelle, l'évolution a favorisé la spécialisation et la collaboration. De même que l'économie mondiale mise sur les atouts locaux et l'échange de biens, les communautés microbiennes des eaux souterraines et du plancher océanique optimisent l'exploitation des rares ressources et survivent dans des environnements *a priori* hostiles grâce à la division du travail.

Comment de telles symbioses émergent-elles? Certains scientifiques pensent que la promiscuité au sein de communautés denses est un facteur essentiel. À mesure que des organismes étroitement liés se reproduisent, leur progéniture reste dans les parages. Cette proximité lui offre l'avantage d'accéder aux ressources parentales, comme un étudiant habitant près de la maison familiale y retournerait pour laver son linge ou piocher dans le

réduisent le taux de partage global et la condamnent à une mort certaine. (Ce scénario s'appelle également la tragédie des biens communs, terme inventé pour décrire un groupe d'agriculteurs partageant des terres; chaque agriculteur est motivé pour avoir un troupeau de bêtes aussi important que possible, ce qui conduit au surpâturage et à la ruine financière pour tous.) Ces dynamiques montrent que la collaboration et le partage sont favorisés lorsque plusieurs générations de la même espèce s'enracinent sur un même territoire, un principe connu sous le nom de sélection de groupe.

Toutefois, ce mécanisme de sélection de groupe est-il le seul responsable de l'existence des collaborations microbiennes ou d'autres facteurs entrent-ils en jeu? Des indices sont venus de plusieurs centaines de mètres au-dessus des suintements de méthane, dans les eaux de surface où ce gaz rencontre une mer baignée de soleil, une zone riche en énergie lumineuse mais appauvrie en nutriments comme l'azote et le phosphore. En effet, les eaux de surface tropicales et subtropicales ont longtemps été considérées comme des «déserts» océaniques, et ce jusque dans les années 1980, quand les scientifiques ont commencé à se pencher de plus près sur ces environnements et ont découvert que les microbes y abondaient.

À l'instar des microbes des eaux souterraines et des sédiments océaniques récemment détectés, ces microbes de surface ont un génome réduit et il est impossible d'en cultiver un sans ajouter des cocktails complexes de nutriments au milieu de culture – un signe clair que ces espèces ont besoin les unes des autres pour survivre. Pourtant, alors que les microbes sédimentaires sont concentrés dans les interstices laissés par les particules minérales – des conditions idéales pour que la sélection de groupe opère –, les microbes de surface flottent librement, constamment chahutés par l'environnement. En l'absence de promiscuité entre voisins, la sélection de groupe ne peut expliquer leur coopération. Une autre force doit être à l'œuvre.

LE PACTE DE PROCHLOROCOCCUS

Une seule goutte d'eau de la surface de l'océan tropical contient environ un million de microbes. Un sur dix est une cyanobactérie connue sous le nom de *Prochlorococcus*. Il s'agit du plus petit et du plus abondant organisme photosynthétique de la planète. L'un de nous (Rogier Braakman) a sondé avec des collègues l'ADN de *Prochlorococcus* pour comprendre comment son métabolisme avait évolué ces dernières centaines de millions d'années. Nous avons créé un arbre de parenté «métabolique» de ce genre de ➤

En milieu hostile, les communautés survivent grâce à la division du travail

frigo. La sélection naturelle favorise donc les gènes qui font que ces ressources sont partagées lorsque les générations suivantes restent proches les unes des autres.

Mais que se passe-t-il si la proximité physique entre les parents et la progéniture diminue et qu'apparaissent des cellules génétiquement divergentes et profiteuses, autrement dit l'équivalent cellulaire de pique-assiette? Ces cellules récoltent les avantages des ressources partagées sans payer le coût de leur fabrication, envahissent la communauté,