



L'ESSENTIEL

> Les scientifiques savent depuis longtemps que les microbes ont joué un rôle capital dans le développement de la vie sur Terre. L'idée communément admise était que les communautés microbiennes fonctionnent sur la base d'une compétition pour les ressources.

> Mais une profusion de nouvelles données sur les microbes qui peuplent

les fonds marins et les eaux souterraines dans le monde entier a révélé que de nombreuses espèces collaborent avec d'autres.

> Ces découvertes suggèrent que la coopération entre microorganismes serait le mode de fonctionnement standard de la vie microbienne et la force motrice de la biosphère.

LES AUTEURS



JEFFREY MARLOW
postdoctorant au
département de biologie
évolutive et organismique
de l'université Harvard,
aux États-Unis



ROGIER BRAAKMAN
chercheur
au département
d'ingénierie civile
et environnementale
du MIT, aux États-Unis

L'esprit d'équipe des microbes

La loi du plus fort ne prime peut-être pas chez les microorganismes. Au contraire, la coopération entre espèces serait fréquente. Au point d'influer sur le climat.

Huit cents mètres sous la surface de l'océan, au large de la côte de l'Oregon, les phares du submersible *Alvin* illuminent une oasis de vie colorée. Des tapis moelleux de microbes blancs, jaunes et orange recouvrent le fond marin parsemé de champs de palourdes et de moules. Des poissons aux yeux globuleux – des sébastes à bouche jaune – observent le sous-marin avec méfiance, tandis que des panaches de bulles s'élèvent de monticules composés de roches à dominante calcaire. L'auréole lumineuse attire les visiteurs comme un leurre et révèle graduellement le décor semblant tout droit sorti d'un autre monde.

Quelques heures plus tôt, lors de cette expédition de 2010, l'un de nous (Jeffrey Marlow) s'était glissé dans la grande sphère en titane qui constitue l'habitacle de l'*Alvin*, en compagnie de deux autres explorateurs. Nous avons collé nos

visages aux fenêtres circulaires en même temps que nous descendions dans un kaléidoscope de teintes bleutées. Notre destination était Hydrate Ridge, une zone rocheuse où de vastes quantités de méthane suintent de la croûte terrestre. La découverte de sites semblables à Hydrate Ridge a explosé ces dernières années (une seule expédition dans l'est du Pacifique, en 2016, en a exhumé 450) et les scientifiques s'efforcent aujourd'hui de comprendre leur impact sur l'environnement. Le méthane est, après tout, un puissant gaz à effet de serre: bien qu'il ne compose que 0,00018% de l'atmosphère, il représente 20% de son potentiel de réchauffement. Selon des estimations, 10% du méthane qui se retrouve dans l'atmosphère chaque année remonte du fond des océans. Une libération totale du méthane du plancher océanique mènerait à une apocalypse climatique, mais quelque chose empêche le gaz d'atteindre la surface: les microbes qui s'en nourrissent dans les roches. >

> 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

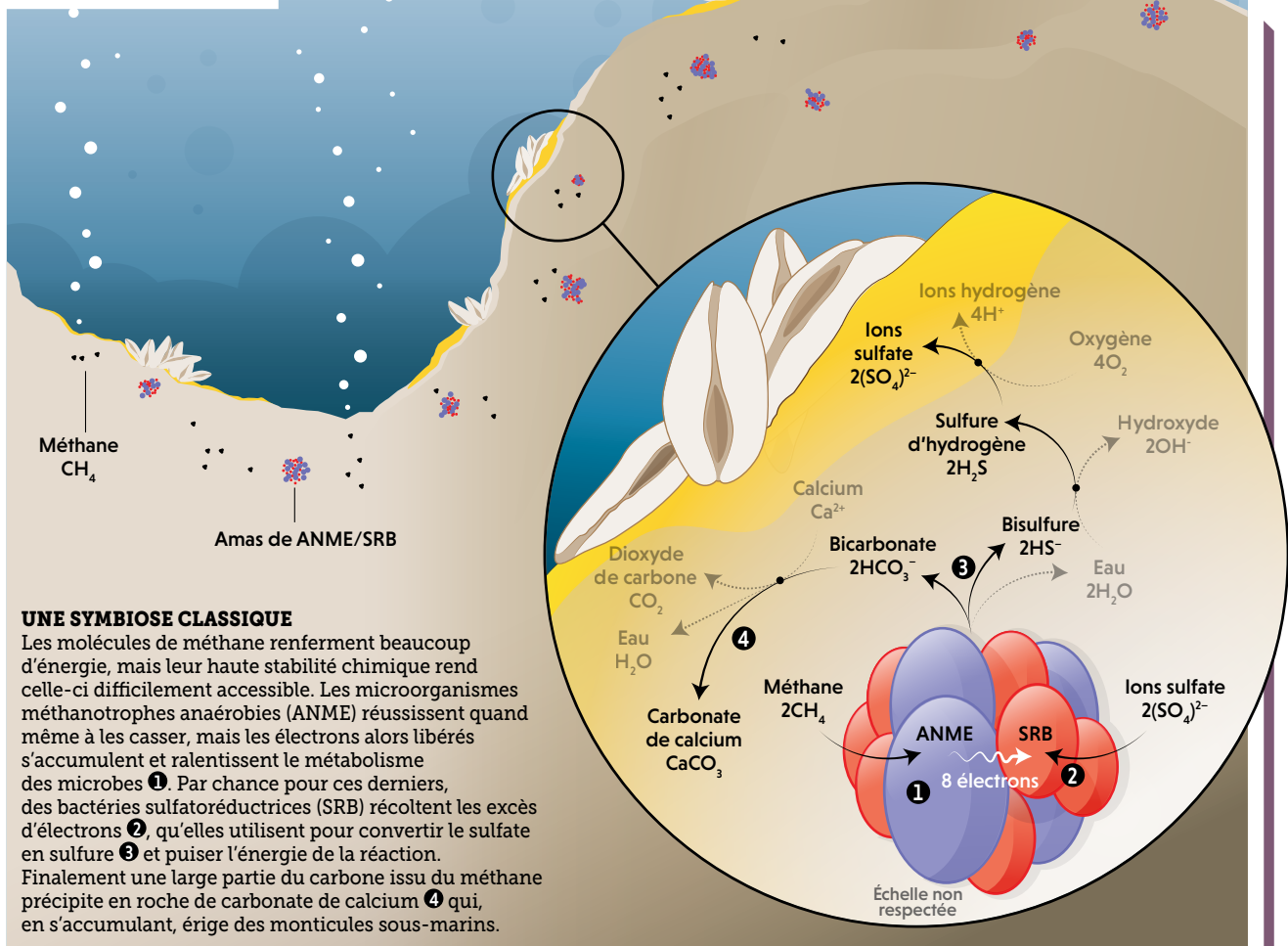


essentiel de la biosphère et de son évolution: en partageant énergie, information génétique et fonctions métaboliques avec leurs voisins, les microbes s'ouvrent à de nouveaux modes de vie et deviennent capables de coloniser des habitats jusque-là inhospitaliers.

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.



tandis que Jeffrey Marlow et ses collègues le guidant 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.

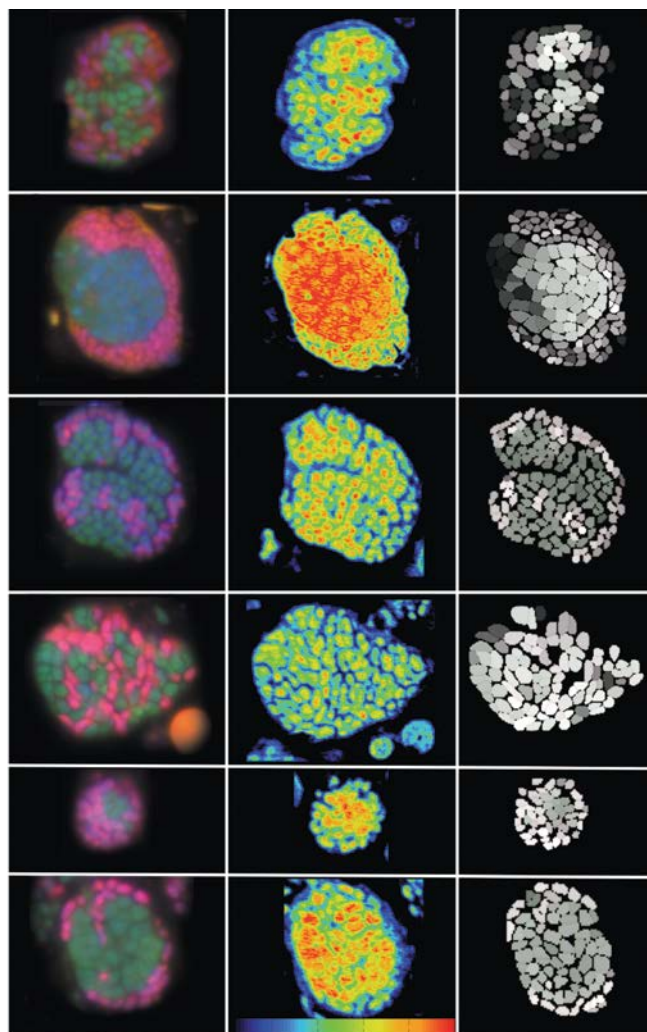
Ce mécanisme – l'oxydation anaérobie du méthane, c'est-à-dire en l'absence d'oxygène – serait impossible sans cet appariement entre ➤

> 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.

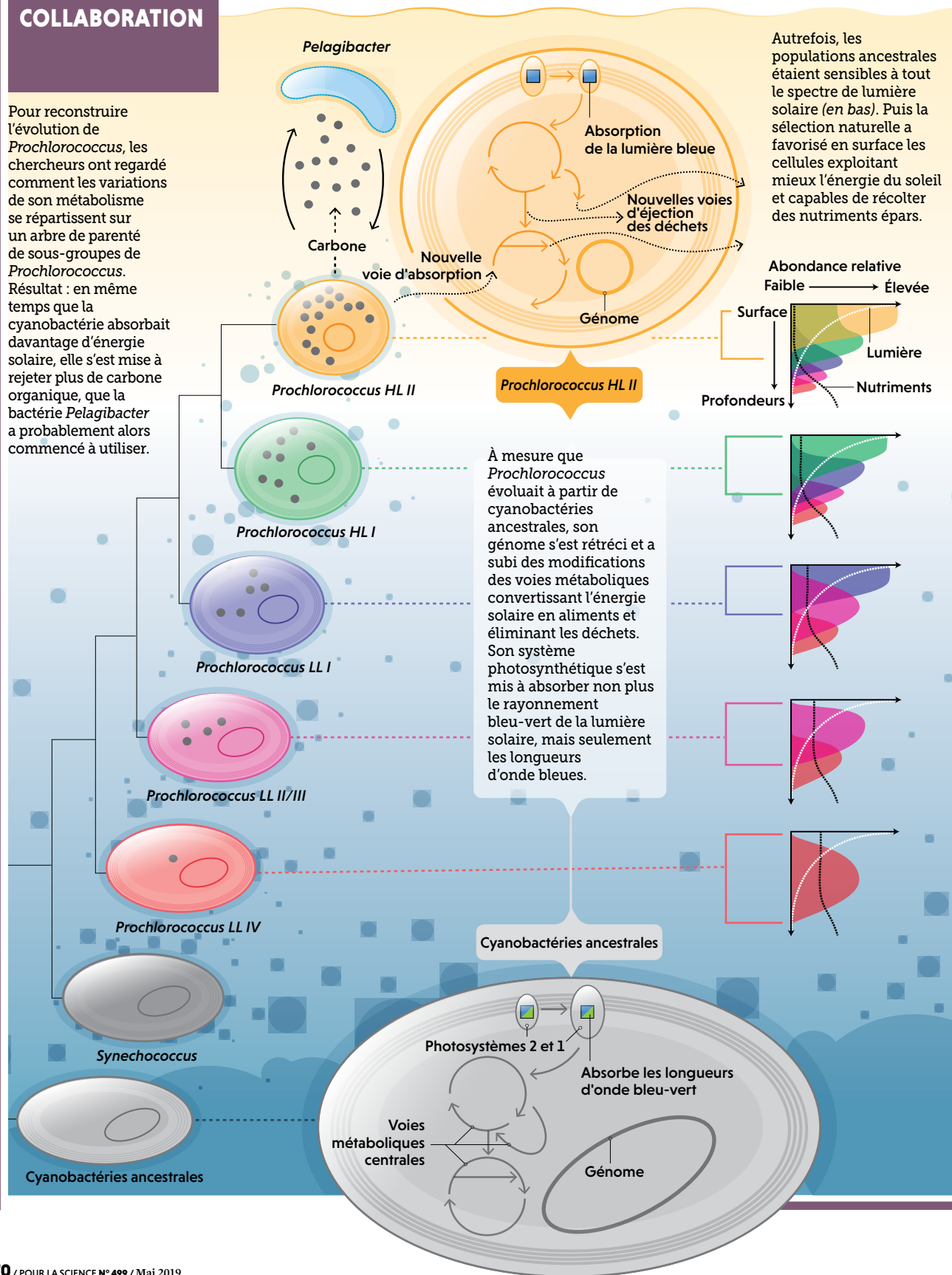
Mais que se passe-t-il si la proximité physique entre les parents et la progéniture diminue et qu'apparaissent des cellules génétiquement divergentes et profiteuses, autrement dit l'équivalent cellulaire de pique-assiette? Ces cellules récoltent les avantages des ressources partagées sans payer le coût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

HISTOIRE D'UNE COLLABORATION

Pour reconstruire l'évolution de *Prochlorococcus*, les chercheurs ont regardé comment les variations de son métabolisme se répartissent sur un arbre de parenté de sous-groupes de *Prochlorococcus*. Résultat : en même temps que la cyanobactérie absorbait davantage d'énergie solaire, elle s'est mise à rejeter plus de carbone organique, que la bactérie *Pelagibacter* a probablement alors commencé à utiliser.

Il y a des millions d'années, deux des microorganismes marins les plus abondants — *Prochlorococcus* et *Pelagibacter* — se sont associés de telle façon que chacun profite des déchets de l'autre. Leur collaboration a posé les

bases de l'oxygénation des océans — un phénomène qui a révolutionné la vie sur Terre. Des études récentes du métabolisme des deux organismes ont révélé comment leur partenariat est né et s'est développé.



- > cyanobactérie en cartographiant les variations de son réseau métabolique – les réactions biochimiques qui convertissent les éléments nutritifs en constituants cellulaires – sur un arbre de parenté génétique qui montre les relations entre les différents types de *Prochlorococcus*.

Or en comparant cet arbre métabolique des sous-groupes de *Prochlorococcus* avec les caractéristiques de leurs milieux d'origine (la quantité de lumière reçue et la concentration en nutriments), nous nous sommes rendu compte que l'évolution avait sélectionné des lignées de cellules capables de récolter au mieux l'énergie solaire et de moissonner des nutriments clairssemés. Dans le même temps, puisqu'absorber davantage d'énergie accélère le métabolisme du carbone, les cellules ont commencé à être saturées en carbone. Elles ont alors libéré sous forme de déchets des molécules riches en énergie, renfermant du carbone organique, à la manière d'une soupape d'échappement relâchant la pression d'une cocotte. Les cyanobactéries *Prochlorococcus* sont ainsi devenues des usines cellulaires, absorbant la lumière du soleil et rejetant du carbone organique.

Ce flux de déchets, à son tour, est devenu une ressource attrayante pour les microbes incapables de synthétiser eux-mêmes leurs constituants et qui doivent donc les puiser dans leur environnement. Or parmi ces organismes marins figure *Pelagibacter*, qui est

Prochlorococcus pourrait utiliser comme énergie lorsque le soleil se couche. Chaque membre de ce partenariat recyclerait ainsi les déchets de l'autre, dont il extrairait de l'énergie par ailleurs inutilisée.

Ces découvertes, publiées en 2017, éclairent d'un jour nouveau l'évolution passée des communautés microbiennes dans les océans et les autres habitats de surface. À mesure que les cellules ont appris à mieux exploiter les nutriments éparpillés à leur disposition, ces ressources se sont encore raréfiées, ce qui a modifié en conséquence le régime alimentaire de tous les autres organismes. Ainsi, les pique-assiette n'ont pas leur place dans ces écosystèmes, car les cellules qui ne font que consommer et ne produisent pas de carbone organique sont moins aptes à acquérir d'autres nutriments tels que l'azote ou le phosphore. La consommation de nutriments et la production de déchets organiques sont inextricablement liées, ce qui renforce le lien *Prochlorococcus-Pelagibacter* favorisé par la sélection naturelle. Cette puissante entente montre que la promotion des interactions collaboratives au fil de l'évolution ne concerne pas seulement les groupes de cellules génétiquement apparentées avec une forte promiscuité. Au moins dans certains cas, ce moteur évolutif serait simplement un sous-produit – une boucle de rétroaction autoamplificatrice – d'une sélection agissant sur des cellules individuelles.

HARMONIE OU LOI DE LA JUNGLE ?

Le partenariat *Prochlorococcus-Pelagibacter* est peut-être né de quelques changements génétiques mineurs, mais ses effets à long terme ont été énormes. Lorsque les ancêtres de *Prochlorococcus* et de *Pelagibacter* ont colonisé les océans, il y a entre 600 et 800 millions d'années, les eaux étaient pauvres en oxygène et riches en fer. Le fer est un composant essentiel des protéines photosynthétiques (qui convertissent l'énergie lumineuse en oxygène), mais il est très peu soluble en présence d'oxygène et était donc très peu disponible pour former des protéines. Cet obstacle aurait pu empêcher les organismes photosynthétiques de s'étendre en pleine mer, car le fer serait devenu une ressource rare si ceux-ci s'étaient installés au large et avaient commencé à y produire beaucoup d'oxygène. Mais un élément a tout de même rendu possible cette extension : les déchets de carbone organique de *Prochlorococcus* – alimentés par la croissance du microbe aux côtés de *Pelagibacter* – se lient remarquablement bien au fer, ce qui a dû augmenter sa disponibilité, même en présence d'oxygène. Nous avons donc émis l'hypothèse suivante : grâce à l'affinité de leurs déchets organiques pour le fer, *Prochlorococcus* et *Pelagibacter* ont contribué au >

En surface, la cyanobactérie libère du carbone, que *Pelagibacter* consomme

aujourd'hui presque aussi abondant que *Prochlorococcus* dans les océans de surface tropicaux et subtropicaux. Pour étudier la relation entre ces deux groupes microbiens, nous avons créé un arbre métabolique pour *Pelagibacter*, où nous avons identifié un chemin évolutif qui refermait la boucle collaborative des deux groupes taxonomiques. Alors que *Prochlorococcus* consomme du dioxyde de carbone et libère des composés carbonés organiques, *Pelagibacter* absorbe ces composés et relâcherait à son tour d'autres molécules que

L'EXTRÊME DIVERSITÉ DES INTERACTIONS MICROBIENNES MARINES



Dans la mer, des bactéries et des archées (en bleu) colonisent des agrégats de cellules photosynthétiques dont on distingue ici le contour (des diatomées, par exemple) et de matière non vivante.

P*rochlorococcus* et *Pelagibacter* ne sont que deux représentants de la communauté microbienne très diverse qui habite l'océan. D'une manière générale, l'ensemble des microorganismes (c'est-à-dire les organismes unicellulaires microscopiques) jouent un rôle clé dans les cycles des éléments. Ils sont responsables d'une grande part des flux de matière et d'énergie. Leur implication dans le cycle du carbone est illustrée par le rôle des microorganismes photosynthétiques (le microplancton) qui transforment annuellement environ 40 millions de tonnes de carbone inorganique (le CO_2 , qui provient à l'échelle annuelle de l'atmosphère et de l'océan profond) en matière organique. Environ la moitié de ce carbone synthétisé constitue l'un des déchets dont il est question dans l'article (le carbone organique jeté à la mer par *Prochlorococcus*). Ce carbone est utilisé en tant que substrat de croissance par des microbes, bactéries comme archées. Cette utilisation s'effectue à des temps allant de minutes à quelques semaines.

Comment la vaste diversité des microorganismes influe sur ces transformations et échanges ainsi que sur les flux d'énergie associés est une question encore largement non résolue. De nombreuses études ont récemment mis en évidence une large gamme de substances échangées qui semble constituer la base des interactions spécifiques de deux espèces microbiennes. À titre d'exemple, des vitamines sont échangées contre des composés organiques,

les composés riches en carbone sont troqués contre des substances contenant de l'azote, du phosphore, du soufre ou du fer. L'excrétion par un microorganisme d'hormones régulant la division cellulaire d'une autre espèce de microbe représente un autre exemple d'interaction.

Mais comment toutes ces cellules peuvent-elles s'épauler alors qu'elles sont présentes de manière diluée dans l'océan? En effet, si l'on considère une distribution homogène de mille millions de microbes dans un litre d'eau de mer, la distance moyenne entre une cellule et sa voisine la plus proche correspond à

Une part des microorganismes se regroupent au sein de patchs riches en substrats

environ 100 à 200 fois son diamètre... En fait, il s'avère qu'une part des microorganismes se regroupent au sein de patchs riches en substrats (les composés organiques de manière générale, qui contiennent des éléments tels que du carbone, de l'azote, du phosphore, du soufre, etc.) et que les microbes vont et viennent entre ces patchs et l'eau de mer environnante.

De taille variable (du nanomètre à quelques centimètres), ces patchs se trouvent partout dans l'océan, du fond jusqu'en surface. Ils peuvent être de

différentes natures. Certains consistent en une agrégation de cellules photosynthétiques: la matière organique produite par ces cellules rend ces dernières gluantes et agit comme une colle naturelle. D'autres sont des particules constituées de matière non vivante: la matière organique peut, sous l'action du mouvement de l'eau, former ce qu'on appelle des «microgels». Enfin des débris d'organismes multicellulaires morts ou des particules provenant de sédiments ou d'une rivière peuvent aussi être très attractifs pour les communautés microbiennes.

L'ensemble de ces microniches constituent un objet d'étude formidable pour de futures découvertes sur la richesse des interactions microbiennes dans l'océan et leur impact sur le fonctionnement des communautés microbiennes. Leur étude n'en est qu'à ses débuts. Dans notre laboratoire, notamment, nous nous intéressons au contenu en carbone organique et en fer des patchs et à leur accessibilité pour les microbes dans l'océan Austral. Cette question et d'autres nous amènent à explorer des océans lointains, où nous découvrons des écosystèmes fascinants et vulnérables comme celui de la région des îles Kerguelen. Nous avons observé qu'au début du printemps, des associations se créent entre certaines diatomées (des algues unicellulaires) et des espèces de bactéries et d'archées. Ce résultat suggère que les diatomées façonnent l'habitat pour les microbes et influencent ainsi leur diversité.

INGRID OBERNOSTERER
Laboratoire d'océanographie microbienne,
CNRS, Sorbonne Université

- > développement de la photosynthèse qui a oxygéné les océans. La vie sur Terre n'a plus jamais été la même.

Toutefois, les interactions microbiennes pourraient ne pas toujours reposer sur des partenariats harmonieux. Certains scientifiques pensent même que les relations stables et mutuellement bénéfiques constitueraient l'exception plutôt que la règle. «C'est un monde impitoyable, met en garde le biologiste John McCutcheon de l'université du Montana. Des relations bénéfiques dans un contexte donné peuvent mener, dans des conditions légèrement différentes, au parasitisme ou à la compétition.» La loi de la jungle que John McCutcheon se plaît à voir dans le monde microbien est influencée en partie par le phénomène qu'il étudie : l'endosymbiose, autrement dit l'assimilation d'un organisme complet par un autre. Par exemple, les mitochondries qui produisent l'énergie à l'intérieur de nos cellules ont été il y a longtemps des cellules à part entière et membres d'un groupe connu sous le nom d'alphaprotéobactéries.

L'ENDOSYMBIOSE, PAS SI SYMBIOTIQUE ?

L'endosymbiose a conduit à certaines des innovations les plus importantes de l'histoire de la vie, car elle a produit les composants qui caractérisent les cellules complexes et ainsi ouvre la voie à l'évolution des plantes et des animaux. Compte tenu de ces exemples positifs, «il est facile d'imaginer les endosymbioses comme une sorte de relation symbiotique, presque amicale, entre les deux organismes, alerte John McCutcheon, mais je pense que c'est une interaction relevant davantage de l'exploitation». Et le chercheur de noter que l'histoire de l'évolution est probablement jonchée de tentatives infructueuses d'endosymbiose tenant davantage de la prédation ou du parasitisme.

Des biologistes ont en outre constaté des taux élevés de renouvellement des endosymbiotes (les organismes qui vivent à l'intérieur d'autres cellules). De la même manière qu'un colocataire indélicat finira par être mis à la porte, une espèce incorporée peut elle aussi être remplacée par un autre postulant. Cela est souvent observé dans le phénomène d'endosymbiose, ce qui dénote une relation compliquée pour les deux partenaires. Les recherches de John McCutcheon confirment que les interactions des organismes sont bien une force dominante. Elles pointent aussi les vraies motivations de leurs acteurs : «Chaque organisme ne voit que son intérêt et toutes les interactions ne sont pas bénéfiques pour tout le monde.»

Les communautés microbiennes interconnectées ont un autre inconvénient plus fondamental : si jamais un membre du groupe faiblit,

le reste du réseau qui dépend de lui peut s'effondrer. En théorie, l'existence de dépendances métaboliques au sein des communautés bactériennes collaboratives rend celles-ci plus fragiles que les colonies composées d'organismes autonomes où chacun s'occupe de ses affaires.

En 2012, la microbiologiste Ashley Shade, de l'université d'État du Michigan, et ses collègues ont examiné 378 études de microbiotes (l'ensemble des microorganismes d'un milieu) du sol, de la mer, d'eau douce, de l'intestin d'animaux ou utilisés dans l'industrie afin de dégager des principes généraux sur la résistance des communautés aux perturbations externes et sur leur aptitude à revenir à l'état initial. Les chercheurs ont découvert que 56% des analyses faisaient état de modifications métaboliques généralisées après une perturbation – par exemple, l'exposition à la chaleur a poussé une communauté de microbes extraits du sol à cesser de consommer de l'azote. Seulement 10% de ces communautés perturbées ont finalement retrouvé un fonctionnement normal.

Ces résultats doivent être interprétés avec prudence, car bon nombre des études compilées portant sur la résistance des communautés n'ont pas examiné leur éventuel rétablissement. Et pour celles qui l'ont fait, les chercheurs qui les ont menées n'ont peut-être pas attendu suffisamment longtemps pour observer un rétablissement. Néanmoins, une chose est sûre : la biosphère est incroyablement résiliente et se relève toujours après une perturbation majeure – nous ne serions pas là autrement –, même s'il reste encore beaucoup à comprendre sur le fonctionnement des processus de récupération, leur rapidité et les changements qui persistent à long terme.

L'étude des communautés microbiennes et du rôle de ces coopérations n'en est qu'à ses débuts. Les résultats obtenus à ce jour suggèrent que les partenariats métaboliques sont des moteurs de l'évolution et ouvrent aux organismes des territoires nouveaux à coloniser. Mais on commence tout juste à étudier les interactions au-delà de l'échelle microscopique, et replacer ces nouvelles découvertes dans leur contexte réel reste un défi majeur. Combien d'espèces peuvent interagir de façon efficace ? Comment les principes généraux qui façonnent ces interactions changent-ils dans différents environnements ou à différentes échelles d'espace et de temps ? Existerait-il un réseau global de microbes en interaction ? Dans ce cas, les influences de l'homme sur l'environnement se propageraient à travers tout la chaîne et entraîneraient des conséquences mondiales imprévisibles. Continuer à décoder ces réseaux microbiens est d'une importance cruciale à l'heure du changement climatique. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. W. Becker et al.,
Co-culture and biogeography of *Prochlorococcus* and SAR11, *The ISME Journal*, en ligne le 11 février 2019.

R. Braakman et al.,
Metabolic evolution and the self-organization of ecosystems, *PNAS*, vol. 114(15), pp. E3091-E3100, 2017.

J. J. Marlow et al.,
Carbonate-hosted methanotrophy represents an unrecognized methane sink in the deep sea, *Nature Communications*, vol. 5, article 5094, 2014.

Le monde selon JACQUES DEVAULX

En 1583, un jeune pilote et cartographe rassembla, dans un magnifique manuscrit enluminé, toute la science de la « navigation aux étoiles » de son temps, de l'art de se repérer en mer aux cartes les plus récentes du monde.

LE CANOMÈTRE

Jacques Devaulx proposa une utilisation originale de cet instrument. Le Normand Toussaint de Bessard l'avait conçu en 1574 pour déterminer l'écart angulaire entre les nords géographique et magnétique. Devaulx imagina de s'en servir pour déterminer la longitude en l'utilisant pour relever la position des astres et en faisant appel à une règle magique.

© Taschen / Bibliothèque nationale de France

