

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.