

- en profondeur nos idées sur l'évolution des espèces, et même avoir des répercussions sur notre avenir.

UNE THÉORIE, BEAUCOUP DE QUESTIONS

Traditionnellement, l'évolution par sélection naturelle opère au sein de populations, c'est-à-dire d'ensembles d'individus apparentés, lorsque trois conditions sont réunies. D'abord, il faut que les membres d'une population ne soient pas tous semblables. Ensuite, il faut que les différences qui apparaissent influent sur les capacités de survie ou de reproduction. Enfin, il faut que ces traits plus ou moins avantageux soient héréditaires, pour que des adaptations soient transmises de parents à descendants. Dans ce cas, à mesure des générations, les spécimens les mieux adaptés voient leur fréquence au sein du groupe augmenter, et modifient les populations.

L'évolution se déroulerait ici principalement par une compétition sans fin, au sein d'une lignée, où chaque membre, confronté à ses semblables, est soumis à l'épreuve de la sélection naturelle. Selon cette logique, la valeur sélective se mesure souvent par le succès reproductif, c'est-à-dire par le nombre de descendants.

Néanmoins, l'évolution peut aussi *a contrario* façonner l'histoire de la vie en «altérant» les capacités de survie et de reproduction isolées de certains. Les transitions évolutives, rares mais essentielles, rendent compte de ce contre-pied, et complètent la théorie standard de l'évolution. Durant ces événements, de nouvelles espèces émergent d'interactions durables entre des entités biologiques qui, pour l'occasion, perdent leur capacité à se reproduire ou à survivre seules au profit d'un collectif.

Ainsi, depuis près de deux milliards d'années, les mitochondries, descendantes captives des cellules bactériennes ayant contribué à la naissance des cellules eucaryotes, ne peuvent plus se reproduire ni survivre en dehors de ces «nouvelles» cellules. De même, la transition vers la multicellularité, à l'origine par exemple des animaux, a fait suite à la division du travail reproductif entre cellules en interaction qui ont depuis perdu leur capacité à survivre seules. À l'issue d'une transition évolutive, des individus d'un nouveau type constituent donc des nouvelles populations (eucaryotes, organismes multicellulaires, etc.) sur lesquelles la sélection naturelle va désormais agir.

Dans le cadre de ces théories, les évolutionnistes débattent pour déterminer quels éléments (gènes? génomes? organismes?) et quelles populations (mono- ou multispécifiques?) subissent la sélection naturelle ou émergent de transitions évolutives. Depuis une dizaine d'années, les analyses de la dynamique des communautés microbiennes sont venues enrichir considérablement ces débats. Car les travaux sur les microbiomes

laissent entrevoir la possibilité que les théories classiques de l'évolution par sélection naturelle ne modéliseraient qu'imparfaitement l'évolution des cellules microbiennes. Plus précisément, ces théories pourraient sous-estimer le statut évolutif de nombreuses associations microbiennes, en ne les reconnaissant pas comme des groupes capables d'évoluer en tant que tels.

D'HOMO SAPIENS À CHOSMO SAPIENS

Les débats sur l'holobionte (voir l'entretien avec M. A. Selosse, page 48) illustrent ces questions nouvelles. Sommes-nous des assemblages coconstruits par des informations génétiques de microbes et d'humains, des *Chosmo sapiens* (un collectif «métahumain» intégrant les microorganismes qui nous accompagnent), plutôt que des *Homo sapiens* dont certains traits caractéristiques seraient uniquement codés dans les gènes de notre espèce? Et si les biologistes se trompaient sur les frontières réelles de notre être? Autrement

L'UNIVERS DES MICROBES EST PEUT-ÊTRE EN RÉALITÉ UN MONDE FONDAMENTALEMENT MULTICELLULAIRE ET STRUCTURÉ

dit, existons-nous vraiment, aux yeux de la sélection naturelle, sans nos microbes?

Plus généralement, c'est la question de notre capacité à identifier les entités filtrées par la sélection naturelle qui est posée par les analyses portant sur les associations microbiennes. Certaines d'entre elles méritent-elles d'être pensées comme des individus évolutifs de plein droit, et lesquelles? Un biofilm composé d'espèces diverses, poussant aux abords d'un étang, a-t-il un avenir évolutif? Une communauté de microbes, capable de fixer l'azote par des passages de relais fonctionnels entre membres de différentes espèces (quand des espèces distinctes enchaînent des réactions métaboliques successives), a-t-elle un futur en raison de la sélection naturelle? Si oui, l'enjeu est de taille: les microbiomes pourraient héberger un nombre considérable d'organisations multicellulaires issues de transitions évolutives masquées.

La question se pose désormais: l'évolution microbienne se joue-t-elle principalement au niveau des cellules isolées ou au niveau d'organisations multicellulaires plus intégrées? Certains microbes ne sacrifieraient-ils pas en partie leur potentiel reproductif au profit de la persistance ou de la reproduction d'un collectif

auquel ils appartiennent, à l'instar de certaines cyanobactéries filamenteuses composées de cellules capables de produire de l'énergie et d'autres de se reproduire.

Combien de formes sélectionnables, et non pas combien de cellules bactériennes, les microbiomes abritent-ils? Cette interrogation, inspirée notamment des travaux du philosophe de la biologie Frédéric Bouchard, n'est pas qu'un exercice de métaphysique. L'univers des microbes, qu'on imagine volontiers peuplé de créatures unicellulaires, à l'image de l'emblématique d'*Escherichia coli*, est peut-être en réalité un monde fondamentalement multicellulaire, structuré en d'innombrables collectifs émergents et en sociétés microbiennes, dont l'évolution est par définition mal modélisée par toute théorie qui postule que la sélection naturelle agit au niveau des seules cellules.

DES MICROBES PLURICELLULAIRES?

La question des individus évolutifs cachés (biofilms solidaires, consortiums multispécifiques réunis autour d'un cycle métabolique, communautés unies par la division du travail...) dans les microbiomes est bel et bien du ressort de la science. Elle est ouverte et testable, par exemple en analysant la robustesse et la résilience des interactions microbiennes dans la nature. Certaines associations microbiennes résistent-elles bien au changement? D'autres se répètent-elles malgré les perturbations environnementales? Et du fait de cette robustesse et de cette résilience, d'autres encore augmentent-elles en fréquence dans les microbiomes, comme si elles étaient sélectionnées?

Cette capacité à persister et à se recréer, à former des liens de plus en plus fréquents, fournit de nouvelles mesures pratiques de la valeur sélective. Ici l'attention est portée sur la survie des plus aptes: persister mieux, et pas seulement se reproduire plus, signifie être adapté. Pour débusquer ces curieux êtres, comme des associations microbiennes pérennes et des microbes pluricellulaires, l'analyse des réseaux d'interactions entre microbes apparaît depuis peu comme un outil de choix.

Ainsi, les réseaux de cooccurrence où les microbes retrouvés ensemble dans divers environnements sont directement connectés forment des objets mathématiques encore sous-exploités. Dans ces réseaux, il est possible d'identifier les associations qui tirent leurs épingles du jeu, les liens robustes et les liens résilients entre microbes d'espèces différentes. Ils permettraient par exemple de savoir, dans nos intestins ou dans les océans, quels groupements d'espèces bactériennes se renforcent au cours du temps.

Initialement centrées sur l'étude de l'origine et de l'évolution des espèces, pratiquement

concentrées sur la mesure des capacités de reproduction des membres d'une population, la théorie de l'évolution et ses méthodes classiques pourraient alors fortement évoluer pour intégrer de plein droit les études de l'origine et de l'évolution des symbioses, et la mesure des capacités de persistance de communautés. Dans ce contexte, les études du microbiome ont un rôle majeur à jouer en révélant non seulement de nouveaux acteurs de l'évolution: des microbes et des virus de l'environnement jamais cultivés en laboratoire, mais aussi de nouveaux individus et de nouvelles relations, par exemple des symbioses cachées, des sociétés microbiennes et des transitions évolutives masquées.

ET L'HUMAIN DANS TOUT ÇA?

Ces réflexions sur le devenir évolutif des interactions microbiennes pourraient bien concerner jusqu'à notre espèce! Les études des microbiomes révèlent que nous sommes tous pris dans les mailles d'un réseau d'interactions, connectés notamment à de très nombreux microbes et virus, ainsi qu'à notre environnement. Selon l'évolutionniste Ford Doolittle, nous nous trouvons par conséquent dans une position unique: conscients d'appartenir à un réseau d'interactions qui conditionne l'avenir de notre espèce.

Comme l'atteste la pandémie de Covid-19, nos interactions avec les virus, par exemple, ne sont manifestement pas nécessairement stables ni confortables pour la survie de notre espèce. Là où certains politiques soulignent l'importance d'apprendre à vivre au quotidien dans un monde où frappent et frapperont les pandémies, Ford Doolittle, lui, souligne que sur le long terme, il pourrait être encore plus pertinent d'apprendre à évoluer avec les microbes.

Il est également essentiel de comprendre quelles propriétés architecturales des réseaux qui nous englobent favorisent leur évolution et leur stabilité. Les travaux sur les microbiomes contiennent en la matière des informations indispensables pour penser notre avenir commun, pas seulement sous forme antagoniste. En étudiant les microbiomes, on trouvera peut-être des pistes pour développer des interactions robustes ou résilientes avec certains microbes, de façon à développer des symbioses hommes-microbes adaptées. On pourrait même, comme nous y invite Ford Doolittle, chercher à réaliser une nouvelle transition évolutive, quitte à sacrifier certains de nos intérêts égoïstement humains à la stabilité et à l'évolution d'un collectif biologique et environnemental plus large, plutôt que d'essayer de régner seuls dans une nature surpeuplée de microbes et de virus parfois hostiles.

L'avenir d'*Homo sapiens* passerait alors par son inscription comme composant d'un être multispécifique complexe, largement microbien, conscient d'évoluer et soucieux de sa persistance. ■

BIBLIOGRAPHIE

W. DOOLITTLE, Could this pandemic usher in evolution's next major transition?, *Current Biology*, vol. 30, pp. R841-R870, 2020.