

à la germination ou à la naissance, une foule microbienne colonise l'organisme, en particulier là où il se nourrit: racine et intestin se ressemblent donc par la grande diversité microbienne recrutée à chaque génération. Le sol qui entoure la racine, enrichi en cellules mortes et en sécrétions, attire moult champignons et bactéries (100 à 1 000 millions par gramme de sol). La consommation de ressources minérales par la racine et les molécules émises créent des conditions particulières, qui filtrent une communauté spécifique à partir du sol.

De même, l'intestin abrite une communauté abondante: chez l'homme, avec plus d'un millier d'espèces de bactéries et de levures par individu (plus d'un kilogramme), il compte autant de bactéries que notre organisme comporte de cellules. Se nourrissant des aliments ingérés, la communauté intestinale est aussi filtrée à partir de l'environnement par des comportements alimentaires, les conditions particulières (absence d'oxygène, abondance d'enzymes) et le système immunitaire de l'hôte.

Faut-il préférer les passagers d'un jour ou ceux de toujours? Tout dépend du critère. Les microorganismes recrutés à chaque génération sont très variés, et cette variété peut adapter l'hôte à un milieu différent ou à une alimentation nouvelle. Notre flore digestive nous adapte ainsi à notre régime alimentaire: par exemple, les Asiatiques hébergent des bactéries qui oxydent une toxine du soja (la daidzéine, un perturbateur endocrinien naturel), les Japonais en ont qui digèrent les parois des cellules d'algues rouges, telles que le nori, caractéristiques de leur cuisine.

En termes d'assurance en revanche, un microbe hérité est fiable, alors qu'un microbe à recruter peut faire défaut. Qui essaye de semer des orchidées en milieu naturel échouera en beaucoup d'endroits, par manque des champignons du sol adéquats pour nourrir la jeune plantule.

Éviter les partenaires défavorables

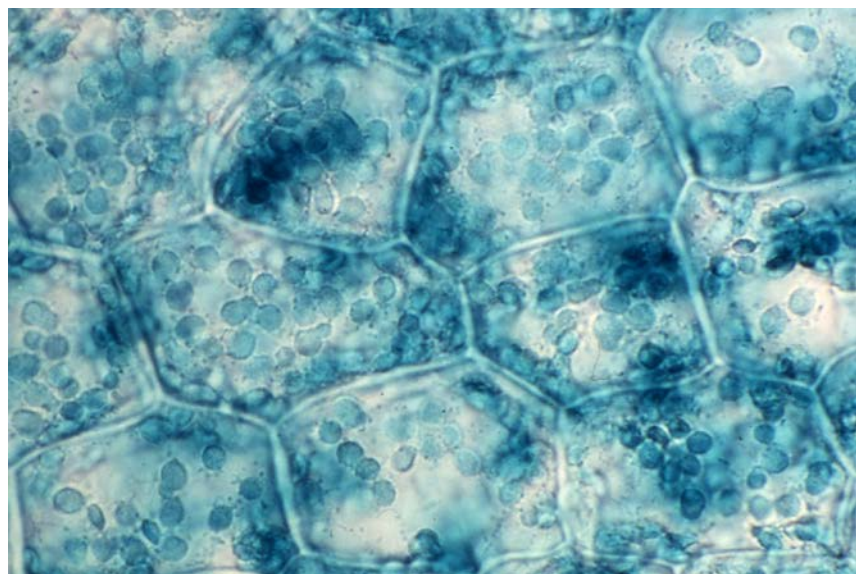
Ces deux types de transmission diffèrent enfin par un autre aspect, l'évitement des partenaires défavorables. Les partenaires hérités depuis longtemps tendent à être plus favorables à l'hôte: comme leur reproduction dépend de celle de l'hôte, ceux qui le favorisent sont naturellement sélectionnés. C'est ainsi qu'ont été sélectionnés les

■ L'AUTEUR



Marc-André SELOSSE, chercheur en biologie végétale, est professeur au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, et professeur invité aux universités de Gdansk, en Pologne, et de Viçosa, au Brésil.

LES CHLOROPLASTES sont des organites des cellules végétales. Grâce à la chlorophylle qu'ils contiennent, ils captent l'énergie lumineuse pour synthétiser des sucres à partir d'eau et du dioxyde de carbone atmosphérique. Les cellules végétales contiennent aussi des mitochondries qui, à partir des sucres produits par photosynthèse, synthétisent de l'ATP, le carburant de la cellule. Mitochondries et chloroplastes sont en fait des bactéries vestigiales, nourries par les cellules qu'elles aident à vivre.



© M.-A. Selosse/Minim

mitochondries, les plastides ou les champignons de *Kentucky* 31.

Du milieu, en revanche, il peut venir le meilleur comme le pire, parasite racinaire ou maladie intestinale. Des mécanismes de type « carotte et bâton » aident l'hôte.

Côté carotte, les microbes favorables sont activement attirés. La racine végétale émet par exemple des strigolactones, reconnues par des champignons favorables du sol: ils colonisent la racine de 90 % des plantes en formant un organe mixte, la « mycorhize ». Là, ils échangent des sucres contre des sels minéraux collectés dans le sol. Les racines des légumineuses émettent des flavonoïdes qui attirent les rhizobiums, des bactéries du sol, lesquels colonisent des nodosités des racines où ils transforment l'azote atmosphérique en ressources azotées pour la plante. Cet apport fait des légumineuses des « engrais verts », même si leur apport azoté est en fait... holobiontique.

Chez l'homme, le lait maternel favorise la colonisation de l'intestin du nourrisson par des bactéries, qui aident à la digestion et protègent des agents des diarrhées. Le lait humain contient en effet des sucres complexes qui sont, par leur concentration (15 grammes par litre), le troisième constituant du lait, derrière le lactose et les lipides, mais devant les protéines. Comme l'enfant ne les digère pas, on les a omis des laits maternisés. Dommage, car ils sont digestes pour des bactéries favorables, telles certaines bifidobactéries qui se sont spécialisées dans leur utilisation.

Côté bâton, des réactions immunitaires rejettent les pathogènes qui lèsent les tissus, et des mécanismes trient les meilleurs

partenaires. Par exemple, sur les racines, tous les champignons capables de former des mycorhizes ne sont pas favorables au même degré à la plante, qui risque donc de nourrir des partenaires inutiles. Après que la plante a formé diverses mycorhizes, elle alimente sélectivement les champignons qui lui apportent le plus de phosphore et d'azote, et moins ceux qui se révèlent inutiles. Ainsi, une longue coévolution avec les microorganismes a façonné, chez les animaux et les plantes, des mécanismes qui optimisent le partenariat.

Alimentation, immunité, développement...

Partenaires de toujours et d'un jour ont fini par occuper des rôles bien définis dans l'holobionte. Ces dernières décennies, des plantes cultivées en sol stérile et des rongeurs élevés en bulle sans microbes (on les dit axéniques) ont permis de révéler *a contrario* des rôles variés, là encore comparables dans l'intestin et sur la racine.

L'alimentation est affaire d'holobionte. Autour de la racine, les champignons mycorhiziens rabattent des sels minéraux du sol, des bactéries solubilisent le fer ou le phosphate ou, comme les rhizobiums, mobilisent l'azote atmosphérique. Aussi, beaucoup de plantes, tels les pins, poussent très mal en sol stérile. Dans l'intestin, les bactéries aident à la digestion par leurs enzymes; elles fabriquent des vitamines (K et B12) et diverses molécules essentielles: privées de bactéries, les souris axéniques requièrent, à croissance égale, une nourriture plus abondante.

Les microorganismes protègent l'holobionte, qui est leur gîte et leur garde-manger. Ils tiennent les pathogènes à distance en les concurrençant localement, et au prix d'une guerre d'antibiotiques qui fait rage dans l'intestin ou autour de la racine. Mais leur effet protecteur passe aussi par l'hôte. Ainsi, les souris axéniques ont un système immunitaire moins développé (moins de lymphocytes, expression atténuée des gènes du système immunitaire), tant au niveau de l'intestin que dans le reste de l'organisme. De même, des plantes dépourvues de microbes racinaires réagissent moins vite et moins intensément aux attaques parasitaires, et subissent des dégâts accrus.

Les microorganismes interviennent en outre dans le développement de l'hôte. En colonisant ce dernier, ils induisent une maturation de son système immunitaire – non pas

seulement une réaction immunitaire, mais une capacité à mieux réagir qui ne serait pas acquise sans eux. L'immunité n'est pas seulement activée, elle est reprogrammée: certains de ses composants sont réprimés, tels que des lymphocytes activateurs de l'inflammation, les *natural killers*, chez les souris. L'explosion actuelle des allergies, situations où le système immunitaire réagit de façon disproportionnée, résulterait d'une vie occidentale trop aseptisée, où la diversité microbienne arrive trop tard dans le développement pour jouer ce rôle de maturation. De fait, les allergies sont moins fréquentes à la campagne, et peuvent être prévenues par des apports de bactéries ciblées dans l'alimentation infantile.

Enfin, les souris axéniques présentent des altérations comportementales: activité accrue, timidité et anxiété réduite, mauvaise mémorisation... Leur système nerveux révèle des différences avec celui des souris holobiontiques, notamment dans le fonctionnement des synapses ou dans l'expression de gènes majeurs. Ces traits reviennent à la normale après colonisation microbienne, mais uniquement dans le jeune âge, donc tant que le développement est en cours.

La présence bactérienne induit donc aussi, d'une façon encore inconnue, le développement correct du système nerveux. Ce dernier entretient un dialogue complexe avec les microorganismes, qui persiste chez l'adulte, dont le comportement peut être affecté par les bactéries. Par exemple, des bactéries altèrent l'humeur chez les rongeurs et chez l'homme. Les *Campylobacter* favoriseraient des états dépressifs; les lactobacilles et les bifidobactéries réduisent la dépression et le stress: elles miment partiellement l'effet d'anxiolytiques sur le comportement mais aussi, chez l'homme, sur l'activité cérébrale!

Un jour peut-être, des bactéries choisies nous soigneront. En attendant, on s'étonne d'autant d'intrusions dans des fonctions que nous imaginions (à tort) autonomes.

Les microbes s'insinuent jusque dans la reproduction. Quand on stérilise une fleur de sureau (une espèce odorante, utilisée dans des boissons parfumées), elle cesse de synthétiser certains composés attirant les pollinisateurs, et produit trois fois moins de terpènes volatils. Chez les animaux, des interférences microbiennes jouent même avec le choix du partenaire sexuel. Ainsi, quand on mélange des drophiles nourries de mélasse à d'autres nourries d'amidon, les accouplements



LES RACINES DES PLANTES sont souvent des mycorhizes, c'est-à-dire un complexe formé par les racines et par des filaments de champignon, les hyphes (*ci-dessus, les hyphes noires ayant colonisé une racine de hêtre*). Les mycorhizes relient la racine à un réseau qui trouve dans le sol voisin des nutriments; de plus, les hyphes forment, en couvrant la racine, un manchon qui la protège des agressions du sol.