

comparaison avec ce que l'on sait sur les poissons sera sans doute utile pour la gestion des pêcheries.

PLS

Le réchauffement climatique perturbe-t-il les populations de plancton ?

É. K. : On l'ignore pour l'instant, mais *Tara Oceans* a mis en évidence une stricte corrélation entre la température et la composition en archées et bactéries du plancton. Dans les profondeurs où la lumière pénètre, la température est, de fait, le principal facteur environnemental qui influe sur la composition du plancton. On devrait donc pouvoir se faire une idée de la façon dont la distribution des organismes planctoniques changera avec le réchauffement climatique. Par ailleurs, les résultats que j'ai déjà évoqués concernant les flux de carbone sont un avant-goût de ce que l'on peut apprendre sur la place du plancton dans la machinerie climatique de la Terre.

PLS

Quelles suites prévoit-on à *Tara Oceans* ?

É. K. : D'abord, l'exploitation complète des échantillons et données recueillis demandera encore plusieurs années de travail. De nouvelles publications sont d'ailleurs en cours, l'une sur la circulation océanique et la répartition du plancton, une autre sur la métatranscriptomique des eucaryotes, une troisième sur les îles du Pacifique et le rôle du fer, la quatrième sur les génomes de plus d'une centaine d'organismes unicellulaires. Il reste aussi à exploiter la dernière phase de la mission, qui s'est déroulée dans l'océan Arctique. De plus, toutes les données de *Tara Oceans* sont mises en accès libre et public, ce qui permet à tous les chercheurs de les exploiter. Enfin, la goélette *Tara* vient d'entamer (en mai 2016) sa prochaine mission, *Tara Pacific*. Prévue jusqu'en 2018, elle porte sur les systèmes coralliens du Pacifique, et notamment le plancton qui y est associé... ■

Propos recueillis par Maurice MASHAAL

■ BIBLIOGRAPHIE

T. Biard *et al.*, In situ imaging reveals the biomass of giant protists in the global ocean, *Nature*, vol. 532, pp. 504-507, 2016.

L. Guidi *et al.*, Plankton networks driving carbon export in the oligotrophic ocean, *Nature*, vol. 532, pp. 465-470, 2016.

Section spéciale *Tara Oceans*, *Science*, vol. 348, n° 6237, 22 mai 2015 (plusieurs articles).

C. Sardet, *Plancton - Aux origines du vivant*, Ulmer, 2013.



LES { Partagez les savoirs }

RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : "les rendez-vous du Muséum"

POUR LA SCIENCE

COURS PUBLICS

Cycle 3 paléontologues du 19^e siècle face à l'évolution
Judi 24 novembre - 18h : D'Orbigny préoccupé par l'évolution
Avec **M. Godinot**, paléontologue, directeur d'Étude à l'École Pratique des Hautes Études, Muséum

Grand Amphithéâtre du Muséum — 57 rue Cuvier, Paris 5^e

Cycle Exploration des faunes marines profondes tropicales : Tropical Deep-Sea Benthos fête ses 40 ans
Lundi 7 novembre - 18h : Au cœur de la diversité des crustacés
Avec **L. Corbari**, chercheuse en Biologie marine, spécialiste des crustacés, Muséum
Lundi 14 novembre - 18h : La systématique des gastéropodes venimeux
Avec **N. Puillandre**, spécialiste de la systématique évolutive des gastéropodes marins, Muséum
Lundi 21 novembre - 18h : Des données biodiversité à la gestion des espaces naturels : enjeux dans les grands fonds
Avec **S. Samadi**, professeur, Muséum, **J. Delavenne**, analyste des données biodiversité marine

UN CHERCHEUR - UN LIVRE

Lundi 28 novembre - 18h : En lien avec l'exposition : Précieux vélins. Trois siècles d'illustration naturaliste.
Par **P. Heurtel**, conservatrice, chef du service des collections de la Bibliothèque, Muséum.
M. Lenoir, conservatrice, directrice honoraire de la Bibliothèque, Muséum

FILMS

Cycle « Expéditions : l'usage du monde »
Samedi 19 novembre - 15h : Milieu ou « Milieu »
Les aventures d'un entomologiste japonais aux prises avec un imminent typhon
Réalisation : **D. Faure**, France, 2015, 52 min. - En présence du réalisateur

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution — 36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e



Microbiote : les plantes aussi !

De nombreux microorganismes interagissent avec les végétaux au niveau des racines, des feuilles, des graines... L'étude d'une plante modèle, l'arabette des dames, commence à révéler l'importance de leur rôle et les mécanismes de leur sélection.

Stéphane Uroz, Aurélie Cébron, Aurélie Deveau et Francis Martin

Nous ne sommes pas seuls ! Dans notre corps, des milliards de microorganismes microscopiques contribuent à notre santé, à notre croissance et à notre résistance aux stress environnementaux. Ces microorganismes (bactéries, champignons, virus...) constituent ce que l'on nomme un microbiote. Et de la même façon que nous hébergeons un microbiote à la surface de notre peau, dans notre système digestif et ailleurs, des microbiotes ont aussi été mis en évidence chez les autres animaux.

Des interactions nombreuses

Et les plantes ? Ont-elles aussi un microbiote ? Oui : les plantes ne poussent pas de manière axénique (en l'absence de tout germe) dans la nature. Au contraire, elles hébergent de nombreux microorganismes – bactéries ou champignons – bénéfiques ou néfastes à leur surface, dans leurs tissus et au voisinage de leur système racinaire (voir la figure ci-contre).

Dès leur apparition dans les milieux aquatiques puis lors de la colonisation des environnements terrestres, les plantes ont été en interaction avec les microorganismes. La longue évolution des plantes et des microorganismes, parfois commune, a conduit au développement de nombreux types d'interactions allant de la symbiose stricte à des interactions bénéfiques ou au contraire néfastes avec des microorganismes hétérotrophes (se nourrissant de composés organiques). L'ensemble de ces interactions contribue à la nutrition et à la santé des plantes et conditionne leur développement.

Mieux comprendre le microbiote des plantes est donc un important objectif de recherche : cela devrait nous aider à développer des modes de culture plus adaptés et plus respectueux de la qualité des sols.

Décrivons d'abord la composition et la distribution spatiale du microbiote des plantes. Nous verrons ensuite quelles avancées sont venues de l'étude du microbiote d'une plante modèle, l'arabette des dames, et quelles sont les applications

LES DIVERS TISSUS ET ORGANES développés par les plantes durant leur cycle de vie constituent autant d'habitats colonisés par les microorganismes. Ces habitats sont indiqués ici, accompagnés de l'ordre de grandeur de la densité correspondante en microorganismes.



potentielles, notamment dans le cas de la dépollution des sols.

Pendant son développement, une plante passe de l'état de graine à celui d'adulte caractérisé par une partie aérienne et par une partie racinaire. On peut dès lors se demander si une plante héberge un microbiote ou plusieurs.

Plusieurs microbiotes plutôt qu'un seul

Cette question est longtemps restée sans réponse – jusqu'à l'essor récent de nouvelles techniques de séquençage d'ADN à haut débit, qui ont permis aux biologistes d'identifier finement les microorganismes contenus dans les différentes parties des plantes, aux différents stades du cycle de vie. Ces études sont en général fondées sur la reconnaissance de séquences d'ADN particulières, servant de marqueurs phylogénétiques, que l'on compare avec les séquences de référence enregistrées dans des bases internationales de données. Cela permet de déterminer les espèces ou les genres microbiens présents.

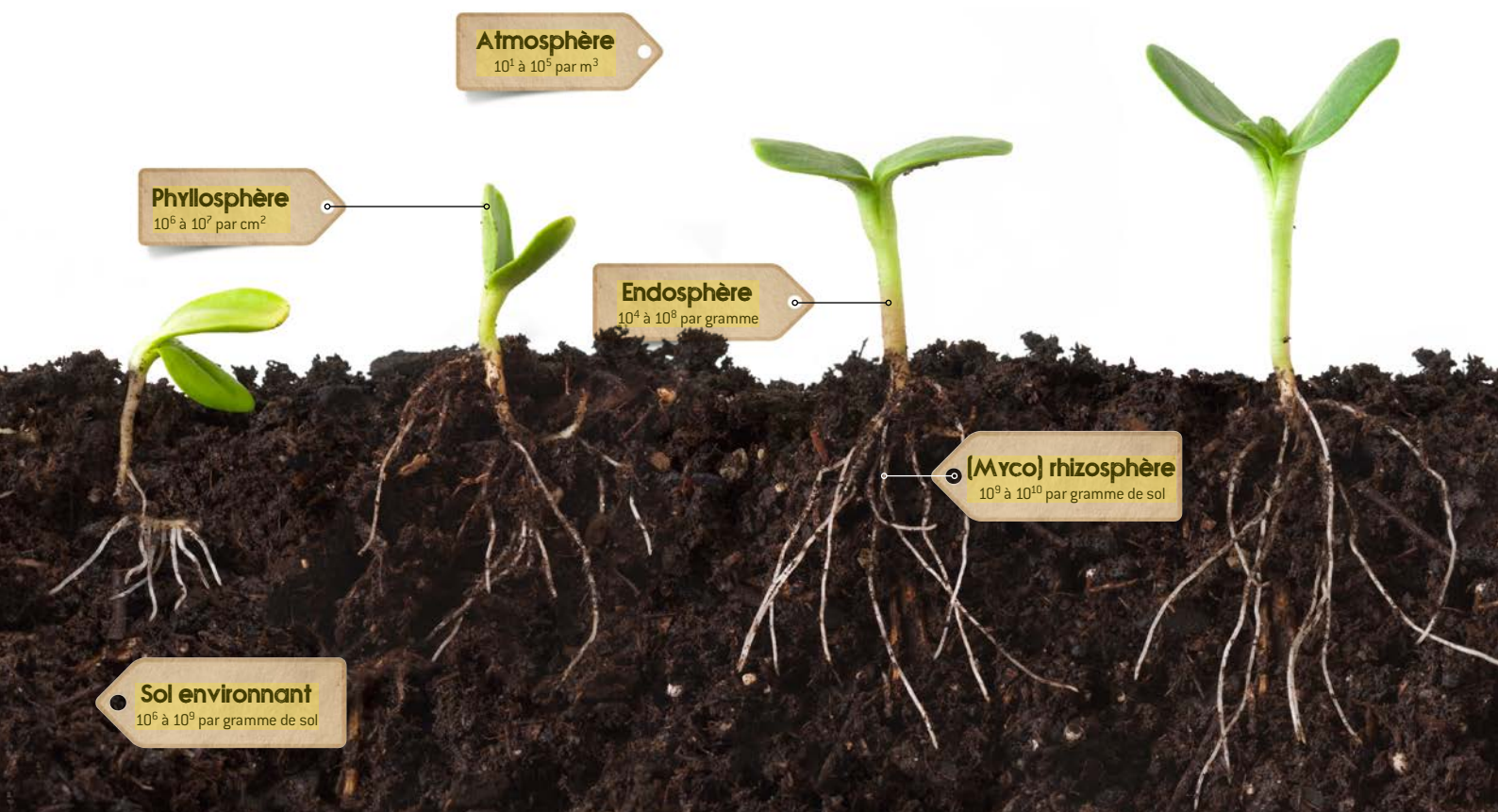
Qu'ont révélé ces études ? Dès le stade de la graine, un microbiote complexe est déjà en place à l'intérieur et à sa surface, ce qui suggère que la plante mère transmet un microbiote à sa descendance (les graines). Ce microbiote est composé de bactéries et de champignons promoteurs de croissance, qui peuvent aider à l'installation de la future plante (en permettant un meilleur accès aux nutriments par exemple), mais aussi de pathogènes qui peuvent au contraire éliminer les graines mal formées. Dès la germination de la graine dans le sol, s'enclenche une phase d'interaction avec le microbiote indigène du sol, au niveau de la zone entourant la graine et nommée spermosphère.

Ensuite, lors de sa croissance, la plante développe un ensemble d'interfaces avec son environnement : les racines, les tiges, les fleurs et les feuilles. Historiquement, c'est le microbiote de la zone racinaire – la rhizosphère – qui a été le plus étudié. Dès 1904, l'un des pionniers de la microbiologie du sol, l'Allemand Lorenz Hiltner, a décrit les propriétés physicochimiques et les fortes densités de microorganismes caractérisant la rhizosphère. Cette zone correspond aux

L'ESSENTIEL

- Comme les animaux, les plantes partagent leur vie avec une multitude de microorganismes.
- Ces communautés bactériennes et fongiques se sont spécialisées en fonction des parties de la plante qu'elles colonisent.
- Ce microbiote rend de nombreux services à la plante, qui contrôle en partie sa composition.
- L'étude du microbiote de l'arabette révèle le rôle du microbiote et les mécanismes de sa sélection.

© Katrina Leigh / Shutterstock.com





©SINTAR/Shutterstock.com

L'ARABETTE DES DAMES (*Arabidopsis thaliana*) a attiré l'attention des chercheurs dès le début du XX^e siècle, car sa petite taille permet la culture simultanée de milliers de plants en laboratoire (photographie ci-dessus). Son cycle de vie de deux mois, les milliers de graines qu'elle produit, la petite taille de son génome et la possibilité de la manipuler génétiquement pour tester des hypothèses de travail en ont fait la plante modèle des laboratoires de biologie végétale.

quelques millimètres de terre entourant la racine : elle est sous l'influence des rhizodépôts (composés chimiques libérés par la racine). Plus tard, cette définition a été complétée par l'Italien Angelo Rambelli, qui a intégré au concept de rhizosphère la présence et l'action des champignons symbiotiques associés au système racinaire de certaines plantes, d'où le concept de mycorrhizosphère (du grec *mûkês* pour « champignon » et *rhiza* pour « racine »).

En dehors de la rhizosphère, de nombreuses études ont mis en évidence l'existence d'un microbiote à l'intérieur des tissus des plantes, c'est-à-dire dans l'endosphère. Il se distingue de celui de la rhizosphère, tant en termes de complexité que de densité, bien que beaucoup de groupes bactériens semblent communs. Cette distinction a notamment été mise en évidence récemment par une équipe de chercheurs du laboratoire américain d'Oak Ridge, en comparant les microbiotes rhizosphériques et endosphériques du peuplier.

Enfin, la dernière interface développée par la plante avec son environnement correspond aux feuilles : la phyllosphère. Le microbiote correspondant est-il issu du microbiote du sol, de la plante mère ou au contraire de dépôts atmosphériques ? Si la réponse est aisée pour certains pathogènes

apportés par le vent tels que la rouille foliaire du peuplier (*Melampsora larici-populina*), il n'en est pas de même pour les autres microorganismes.

En effet, les fortes fluctuations de température et d'humidité, l'irradiation par les ultraviolets et la faible quantité de nutriments disponibles suggèrent que la part stable du microbiote de la phyllosphère doit être adaptée aux conditions régnant à la surface des feuilles. À ce titre, plusieurs travaux sur différentes plantes ont révélé un enrichissement en bactéries capables de dégrader le chlorométhane, un composé produit abondamment par les feuilles végétales, mais qui est aussi un polluant issu de l'industrie.

Un microbiote structuré

Ainsi, les différentes interfaces (organes et tissus) de la plante sont chacune caractérisées par un microbiote spécifique, potentiellement capable de promouvoir la nutrition, la santé et la croissance de l'hôte. Cette première description suggère aussi qu'une partie du microbiote spécifique de chaque interface végétale est contrôlée par la plante au travers de signaux complexes, qui peuvent varier d'une interface à une autre.

Pour autant, comment se structure le microbiote des plantes ? Pour mieux le comprendre, de nombreux chercheurs à travers le monde ont multiplié les expériences sur diverses espèces, notamment des arbres comme dans notre équipe, mais surtout sur l'arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*). Cette plante est, dans les laboratoires de biologie végétale, l'équivalent de la souris des laboratoires de biologie animale (voir la photographie ci-dessus). Son étude a contribué à la compréhension de multiples processus d'intérêts agronomiques (morphogenèse des fleurs et des graines, résistance aux stress, tolérance au broutage...) et à la mise en lumière des mécanismes par lesquels les plantes se défendent. Mais le rôle de son microbiote n'avait jamais été évalué jusque-là.

Récemment, plusieurs équipes de recherche, notamment à l'institut Max-Planck de Cologne et à l'université de Caroline du Nord, ont commencé à caractériser le microbiote de l'arabette pour tenter de comprendre ce qui régit sa composition et son fonctionnement. Ces questionnements sont d'importance : comme la composition du microbiote influe sur la nutrition, sur la croissance et sur la santé de la plante

■ LES AUTEURS

Stéphane UROZ est directeur de recherche de l'Inra dans l'unité Interactions arbres-microorganismes (unité mixte Inra-université de Lorraine), où travaillent également Aurélie DEVEAU, chargée de recherche, et Francis MARTIN, directeur du laboratoire d'excellence ARBRE. Aurélie CÉBRON est chargée de recherche du CNRS au Laboratoire interdisciplinaire des environnements continentaux (unité mixte CNRS-université de Lorraine).