

nommées statocytes, contiennent des grains d'amidon, les statolithes, plus denses que le cytoplasme environnant. D'une taille de l'ordre du micromètre, ces grains se déposent sous l'action de la gravité sur le fond de la cellule. La plante dispose ainsi de petits « plombs cellulaires » qui lui indiquent le sens de la gravité (la direction « bas »). Ce dispositif ressemble dans son principe à notre propre système de perception de la gravité.

On pense que le poids des statolithes sur le fond des cellules, ainsi que celui de la cellule appuyant sur la paroi qui l'entoure, provoquent l'ouverture de canaux mécanosensibles. En conséquence, des courants ioniques locaux sont créés lorsqu'on incline la tige ou la racine. Ces courants déclencheraient une série de réactions locales, qui aboutiraient à la redistribution des transporteurs d'auxine.

Cependant, l'un d'entre nous (B. Moulia), en collaboration avec Stéphane Douady, physicien au Cnrs, et Renaud Bastien, alors doctorant à l'Inra, a montré que la sensibilité à la gravité ne suffit pas à expliquer les caractéristiques exactes du redressement gravitropique des tiges. En 2013, ces chercheurs ont simulé ce redressement sur ordinateur, en supposant que le mouvement n'était piloté que par la perception de l'écart angulaire de la tige par rapport à la verticale. Le tronc oscillait alors autour de cette dernière, car chaque élément de tige essayait de se redresser indépendamment en entraînant les autres.

PERCEVOIR SON CORPS

Pour obtenir l'alignement sur la direction de la gravité observé dans la nature, il faut supposer que la courbure est rectifiée en continu en tout point de la tige. Il doit donc exister un mécanisme correcteur qui permet à la plante de contrôler sa posture. Il s'agit d'un phénomène de proprioception, terme qui étymologiquement signifie « perception de la configuration géométrique du corps ». Il est comparable à celui rencontré chez les animaux et les humains, même s'il est fondé sur des mécanismes locaux et non sur un traitement nerveux central.

Après avoir incorporé une telle proprioception à leur modèle, les chercheurs ont simulé le redressement de 11 espèces de plantes à fleurs terrestres, qu'ils ont filmé et quantifié par ailleurs. Leur simulation a reproduit fidèlement le redressement de toutes les tiges, de la minuscule germination du blé aux troncs de peupliers. Ainsi, la coordination de millions de cellules motrices est possible par la combinaison d'une perception locale de l'inclinaison et de la déformation (la courbure) des cellules. C'est une nouvelle preuve que les plantes sont capables d'intégrer plusieurs signaux et ne se contentent pas d'une réponse réflexe déclenchée par un

stimulus unique, comme on le pensait récemment encore.

Comment la courbure est-elle perçue et intégrée ? Pour le déterminer, B. Moulia et ses collègues ont réexaminé les travaux antérieurs où la modification de la courbure et la redistribution latérale de l'auxine étaient mesurées. Cette redistribution se révèle trop lente pour provoquer la modification de courbure observée. L'auxine ne semble donc pas intervenir dans la correction proprioceptive de la courbure, même si des travaux supplémentaires seront nécessaires pour le confirmer. Là encore, des canaux mécanosensibles pourraient être en cause.

Ainsi, les plantes réajustent leur posture en permanence, en réponse à plusieurs types de signaux, telles la lumière, la gravité et la déformation. L'ensemble des signaux perçus sont intégrés pour conduire à une coordination des mouvements. L'originalité de la sensitive n'est pas tant sa sensibilité ni sa motricité, mais sa rapidité, qui rend ses mouvements perceptibles. Les mécanismes de sensorimotricité se sont probablement développés lors de la colonisation de la terre ferme, permettant aux plantes de pousser vers le haut en l'absence d'un fluide porteur.

L'étude des mécanismes en jeu demande des analyses allant de l'échelle moléculaire à celle de la plante entière, et associant biologistes, mécaniciens et physiciens. On commence seulement à comprendre les réseaux de signalisation et de régulation impliqués dans la coordination des mouvements végétaux. En particulier, l'auxine semble jouer un rôle important pour traduire les perceptions en motricité et elle interagit avec d'autres signaux (courants ioniques, potentiels d'action, hormones).

Soulignons l'originalité et l'élégance des mécanismes développés par l'évolution végétale. La sensorimotricité des plantes est fondée sur un nombre restreint de structures. Les mêmes cellules assurent à la fois la fonction squelettique et la fonction motrice, et les « influx nerveux » sont transportés par la voie « vasculaire ». En outre, l'ensemble du corps de la plante est doué de sensorimotricité.

Ces découvertes ont remis en cause nombre de nos repères épistémologiques et brouillé la frontière entre les plantes et les animaux. Certains chercheurs, comme Tony Trewavas, de l'université d'Édimbourg, ou Francisek Baluska et Stephano Mancuso, de l'université de Florence, envisagent ainsi un traitement complexe de l'information chez les végétaux, qui permettrait d'adapter le comportement moteur à la combinaison de signaux reçus de l'environnement. On parle de neurobiologie végétale. Le terme est contesté, mais il révèle le bouleversement de nos conceptions. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. CHAMOVITZ, *La plante et ses sens*, Buchet-Chastel, 2014.

A. BARBACCI ET AL., A robust videogrametric method for the velocimetry of wind-induced motion in trees, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 184, pp. 220-229, 2014.

R. BASTIEN ET AL., A unifying model of shoot gravitropism reveals proprioception as a central feature of posture control in plant, *PNAS*, vol. 110, pp. 755-760, 2013.

Advances in plant tropisms, American Journal of Botany, vol. 100, n°1, janvier 2013.

Les végétaux insolites, *Dossier Pour la Science*, n°77, 2012.

P. PELLEGRIN, *Aristote, Les Génies de la Science*, n° 25, 2005.

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 de l'arabette révèle le rôle du microbiote et une partie des mécanismes de sa sélection.

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 CNRS au Laboratoire interdisciplinaire des environnements continentaux (unité mixte CNRS-université de Lorraine).

Le charme discret... de la racine

Les plantes ont, elles aussi, leur microbiote : des milliards de microorganismes vivent contre leurs racines, sur leurs feuilles, dans leurs graines... et leur rôle dans le développement et la santé des végétaux est primordial.



Spermosphère
10¹ à 10³ par gramme

Sol environnant
10⁶ à 10⁹ par gramme

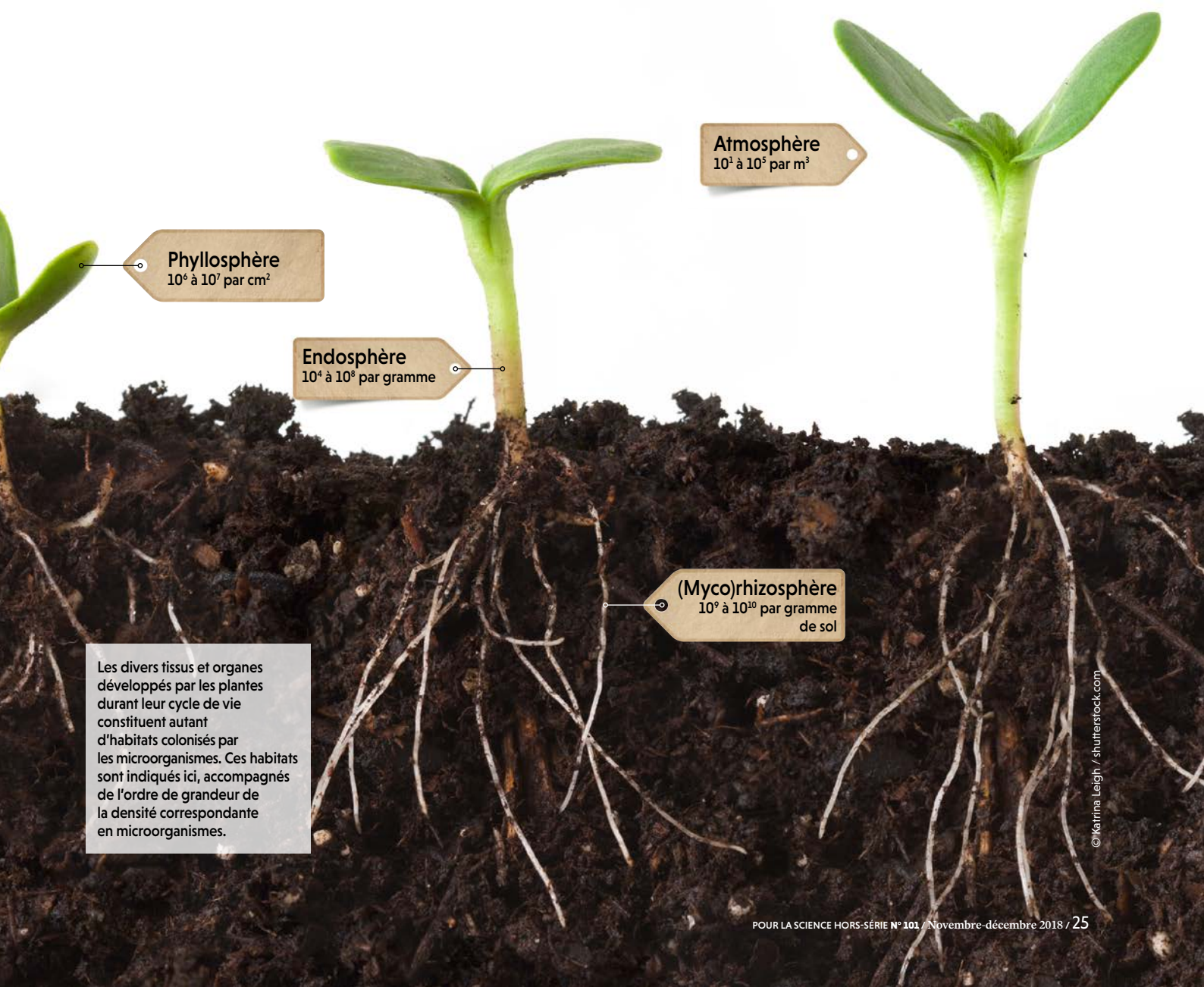
E

n 2015 sortait dans les librairies un ouvrage dont le succès créa la surprise : *Le Charme discret de l'Intestin*. L'auteur, Giulia Enders, s'y livrait à un vibrant plaidoyer des milliards de microorganismes qui habitent dans notre intestin et vantait les nombreuses vertus de cette population (bactéries, champignons, virus...)

sur notre santé. En un mot, elle mettait sous le feu des projecteurs le microbiote. Notre intestin n'est pas le seul organe concerné, ni l'humain le seul être vivant doté d'un microbiote. De fait, des microbiotes ont aussi été mis en évidence chez d'autres animaux. Et les plantes? Ont-elles aussi un microbiote?

Oui: les plantes ne poussent pas de façon axénique, c'est-à-dire 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-dessous).

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'alliance 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. C'est l'équivalent du microbiote humain !

Mieux comprendre le microbiote des plantes pourrait nous aider à développer des modes de culture plus adaptés et plus respectueux de la qualité des sols. Plus encore, on pourrait utiliser ces connaissances pour, par exemple, dépolluer les sols.

Mais en quoi consiste le microbiote des plantes ? 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 de leur 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. On peut ainsi 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, la 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 quelques millimètres de terre entourant la racine : elle est sous l'influence des composés chimiques libérés par la racine.

Plus tard, cette définition a été complétée par l'Italien Angelo Rambelli, qui a intégré au

LES MICROBIOTES ISSUS DU SOL, DE LA RHIZOSPHERE ET DE L'ENDOSPHERE SONT DIFFÉRENTS ET INTERDÉPENDANTS

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 *múkês* pour « champignon » et *rhiza* pour « racine »).

En dehors de la rhizosphère, de nombreuses études ont mis en évidence un microbiote à l'intérieur des tissus des plantes, c'est-à-dire dans l'endosphère ou la surface des feuilles (phyllosphère). Ces microbiotes se distinguent 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 et même phyllosphériques du peuplier.

La surface des feuilles (la phyllosphère) héberge donc elle aussi un microbiote. Mais ce microbiote 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,





L'arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*) est devenue la « souris de laboratoire » des botanistes dès le début du ^{xx}e siècle grâce à plusieurs avantages : sa petite taille qui autorise la culture simultanée de milliers de plants en laboratoire ; son court cycle de vie (deux mois) ; les milliers de graines qu'elle produit ; son petit génome...

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.

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 grâce à des 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 ont multiplié les expériences sur diverses espèces, notamment des arbres comme dans notre équipe, sur les céréales, 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'intérêt agronomique (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.

UN MICROBIOTE TRÈS STRUCTURÉ

Récemment, plusieurs équipes de recherche, notamment à l'institut Max-Planck de Cologne, en Allemagne, et à l'université de Caroline du Nord, aux États-Unis, 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 hôte, les réponses aideraient à développer des méthodes agronomiques faisant moins appel aux engrais et à l'utilisation d'organismes génétiquement modifiés.

Pour tenter de comprendre les paramètres régulant le microbiote de l'arabette, les chercheurs ont utilisé des graines collectées dans différentes régions du monde. Ces graines, qui ont un fond génétique différent et portent un microbiote indigène, ont été semées en conditions contrôlées dans différents types de sols. Il s'agissait de comprendre si le microbiote (essentiellement bactérien) de l'arabette est déterminé par le fond génétique de la plante et le microbiote de la graine, ou par celui du sol dans lequel elle était plantée.

Pour chaque type de sol et pour chaque origine d'arabette, une analyse comparative fondée sur le séquençage à haut débit des gènes 16S *rDNA* (ils codent un élément des ribosomes, qui produisent les protéines, et constituent un des principaux marqueurs phylogénétiques chez les bactéries) a été réalisée sur des échantillons prélevés dans le sol à distance des racines, dans le sol au contact des racines (la rhizosphère) et à l'intérieur des racines (l'endosphère).

Cette approche a mis en évidence que, pour chaque origine d'arabette et quel que soit le type de sol, les microbiotes issus du sol, de la rhizosphère et de l'endosphère sont tous différents, mais interdépendants. Ainsi, le microbiote rhizosphérique est fortement déterminé par le microbiote du sol, lui-même déterminé par les propriétés physicochimiques de la terre, tandis que le microbiote endosphérique est plus fortement déterminé par l'origine de l'arabette. Par conséquent, le microbiote de l'arabette est en partie déterminé par un héritage de communautés microbiennes endosphériques et par l'enrichissement de taxons particuliers du sol à la surface des racines.

L'effet primordial du sol sur le microbiote de la rhizosphère des arbres a lui aussi été récemment mis en évidence par notre équipe. La comparaison du microbiote sélectionné dans la rhizosphère de hêtres (*Fagus sylvatica*) du même >

➤ âge, mais ayant poussé dans des sols voisins variant par leur niveau de fertilité, a révélé que ces microbiotes différaient selon le type de sol en termes de diversité taxonomique, tout en conservant des potentiels fonctionnels similaires. Les plantes sélectionneraient à partir du sol des microorganismes avec des fonctions particulières qui leur sont bénéfiques et ce, quelle que soit l'identité de ces microorganismes

UNE SÉLECTION PAR L'ASPIRINE

Comment s'opère cette sélection ? Deux hypothèses ont été proposées. Selon la première, le microbiote résulterait de l'enrichissement en espèces microbiennes spécifiques capables de consommer les nutriments sécrétés par les racines (exsudats) et les dépôts racinaires. Selon la seconde hypothèse, la plante utiliserait son système de défense contre les maladies pour contrôler aussi son microbiote. Précisons que le système de défense des plantes contre des microorganismes pathogènes est en grande partie régulé par trois hormones végétales : l'acide salicylique (le composé précurseur de l'acide acétylsalicylique, c'est-à-dire l'aspirine), l'acide jasmonique et l'éthylène. Ces trois phytohormones, produites seules ou simultanément par les cellules végétales attaquées, activent les mécanismes de défense et signalent au reste de la plante qu'une infection est en cours.

Pour tester ces deux hypothèses, les chercheurs ont comparé les microbiotes de lignées d'arabettes portant des mutations génétiques relatives à la production des trois phytohormones ou des exsudats racinaires avec celui de la lignée sauvage. Cette comparaison a révélé que les microbiotes rhizosphériques des lignées sauvages et mutantes sont très différents, ce qui confirme le rôle des exsudats racinaires déjà mis en évidence sur d'autres plantes.

Ces travaux, menés grâce au séquençage à haut débit, ont en outre mis en évidence pour la première fois que, parmi les phytohormones du système de défense de l'arabette, seul l'acide salicylique joue un rôle notable dans la structuration du microbiote endosphérique, mais non visible sur le microbiote rhizosphérique. Ces résultats suggèrent qu'en fonction de l'intimité de la relation de la plante avec son microbiote (endosphère vs rhizosphère), les moteurs de structurations ne sont pas les mêmes.

En résumé, l'arabette sélectionne en partie son microbiote racinaire par l'intermédiaire de son système immunitaire et de la production d'exsudats racinaires ; mais la structuration de son microbiote dépendrait aussi fortement d'autres facteurs extrinsèques, dont elle n'a pas la maîtrise (nature du sol, température, humidité...).

Outre cette avancée dans la compréhension de la structuration du microbiote de l'arabette, des études récentes ont confirmé le rôle des

microorganismes dans le développement de la plante, en particulier dans sa floraison. Pour ce faire, des chercheurs de l'université Cornell, aux États-Unis, ont sélectionné des arabettes fleurissant précocement ou au contraire tardivement, et récolté leurs graines pendant plusieurs générations. À chaque génération, le microbiote associé aux racines de ces plantes était collecté puis réinoculé à la génération suivante.

Après dix générations, cette démarche devait conduire les chercheurs à la sélection potentielle de deux microbiotes, l'un accélérant la floraison, l'autre la retardant. Ces deux microbiotes ont ensuite été inoculés à des arabettes « naïves », c'est-à-dire qui n'avaient pas subi de sélection, et à des choux. Résultat ? On obtient une floraison précoce avec le microbiote issu de la sélection de plantes à floraison précoce ; de même, on constate une floraison retardée quand on réinocule le microbiote issu de la sélection de plantes à floraison tardive.

ESSENTIELS CHAMPIGNONS

Les champignons constituent la partie visible du microbiote végétal. En effet, que ce soit dans la litière, dans les couches supérieures du sol ou à la surface des feuilles, les champignons laissent entre-apercevoir des réseaux d'hyphes (filaments fongiques), des carpophores (le « champignon » du langage courant) et des symptômes foliaires visibles à l'œil nu.

De nombreuses espèces de champignons établissent des relations équilibrées et durables avec leurs partenaires végétaux (par exemple les symbioses mycorhiziennes ou lichéniques). Ce type d'interaction entre plante et champignon symbiotique est très ancien, puisque dès que les Archégoniates, les ancêtres des plantes actuelles, ont quitté les océans primitifs afin de coloniser la terre ferme, il y a environ 450 millions d'années, elles ont bénéficié de l'aide efficace des champignons symbiotiques. Ces champignons semblent avoir joué dès cette époque reculée un rôle important pour les plantes dans la tolérance à la sécheresse et dans l'accès aux nutriments.

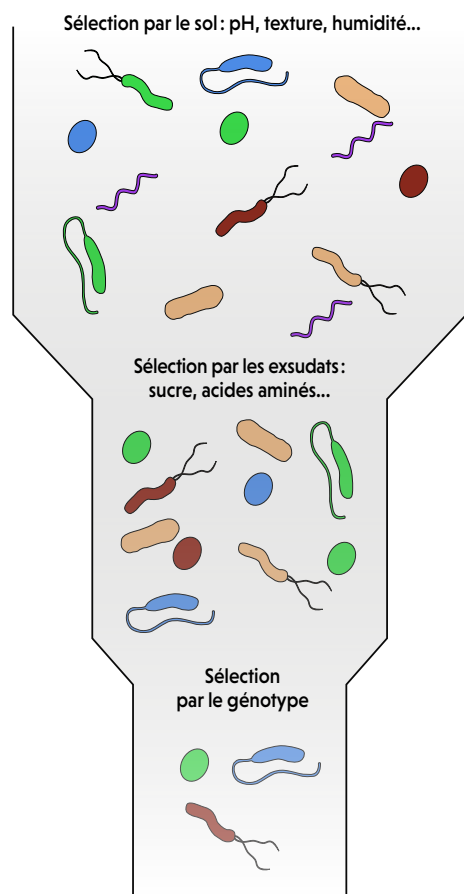
De nos jours, on peut rencontrer différents types de champignons symbiotiques associés aux racines des plantes. Les racines colonisées par ces champignons sont appelées des mycorhizes. L'étude de ces associations symbiotiques a conduit à

l'identification de plusieurs types de mycorhizes (endomycorhizes arbusculaires, ectomycorhizes, mycorhizes arbutoides, etc.). Quel que soit le type d'association, les champignons symbiotiques contribuent à la nutrition hydrominérale (eau, azote, phosphore...) de leur hôte végétal et sont capables d'en modifier la physiologie, permettant ainsi à la plante de s'adapter aux conditions environnementales.

L'amélioration de la nutrition des plantes est notamment due à la capacité qu'ont les champignons mycorhiziens de former de véritables réseaux mycéliens issus des racines mycorhizées, qui explorent de grandes surfaces de sol et s'insinuent dans des pores inaccessibles aux racines des plantes. Cette association multiplie ainsi la surface d'absorption des plantes.

Par ailleurs, les champignons mycorhiziens ont aussi une très grande efficacité dans l'altération des minéraux, dans la minéralisation de la matière organique et dans le transfert à la plante de nutriments tels que l'azote, le phosphore et d'autres ions nutritifs. On a estimé qu'en échange de ces nutriments, 5 à 20 % des sucres issus de la photosynthèse sont alloués au symbiote mycorhizien par la plante hôte.

L'association entre plantes et champignons mycorhiziens constitue donc une importante stratégie végétale.



Même si les mécanismes impliqués dans le processus demeurent inconnus, ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives sur le plan agronomique: ils suggèrent que l'on pourrait moduler des traits végétaux (floraison, résistance à la sécheresse ou aux maladies) à l'aide du microbiote, indépendamment du fond génétique des plantes. En dehors des aspects agronomiques, le microbiote des plantes joue aussi un rôle important dans les sols pollués par des métaux lourds ou des composés organiques toxiques persistants tels que les hydrocarbures.

Pour pousser sur ces sols, la plupart des plantes acquièrent dans leur rhizosphère un microbiote capable d'immobiliser les métaux ou de biodégrader les polluants organiques, jouant ainsi un rôle de barrière protectrice pour la plante. Toutefois, certaines plantes, dites hyperaccumulatrices, favorisent un microbiote capable de solubiliser les métaux, ce qui augmente leur absorption dans la plante. Ainsi, l'arabette de Haller (*Arabidopsis halleri*) accumule deux fois plus de cadmium dans un sol natif que dans une terre stérilisée. Ce microbiote spécialisé, préadapté et tolérant aux métaux serait même en partie transféré de la plante mère à la descendance, par colonisation des graines.

De la même façon, des microorganismes capables de dégrader les hydrocarbures ont été

LA SÉLECTION DU MICROBIOTE RHIZOSPHERIQUE

La comparaison des microbiotes rhizosphériques de diverses plantes provenant de différents sols renseigne sur le processus de sélection. Trois filtres successifs semblent à l'œuvre:

- 1) Les caractéristiques du sol (son pH, sa texture...).
- 2) Les composés chimiques produits par les racines, ou «rhizodépôts», dont les bactéries et champignons peuvent se nourrir.
- 3) Un tri se fait finalement en fonction de certaines des caractéristiques génétiques de la plante (son génotype).

détectés à la surface des graines de certaines plantes et dans leur rhizosphère. Ils procurent à leur plante hôte un avantage adaptatif pour se développer sur les sols pollués. Ces phénomènes naturels peuvent être mis à profit dans la recherche de bioprocédés de dépollution. La mise au point de telles techniques, combinant les potentiels des plantes et de leur microbiote associé – c'est la phytoremédiation –, est aujourd'hui une priorité, car elles constitueraient une alternative à l'excavation et au traitement chimique des polluants.

Quels enseignements tirer de ces premières recherches sur le microbiote des plantes? Grâce à ces approches simplificatrices, fondées sur l'emploi d'un sol stérilisé réinoculé avec des microbiotes plus ou moins complexes ainsi que de plantes mutantes, la compréhension des relations complexes entre la plante et son microbiote a beaucoup progressé. Le rôle de ce dernier dans la nutrition, le développement et la santé des plantes est aussi de plus en plus clair: il est essentiel dans l'accès à des réserves de nutriments non accessibles directement aux racines des plantes. Le microbiote module aussi la physiologie et la phénologie – les événements périodiques qui font la vie des plantes: floraison, chute des feuilles, etc.

UNE BIODIVERSITÉ MENACÉE

Le microbiote constitue aussi une première barrière de défense contre les organismes pathogènes et les polluants. Si une partie de ce microbiote semble être modulée dans sa composition et son activité par la plante elle-même, une part significative provient de l'environnement, et notamment du sol. Les expériences en conditions contrôlées montrent d'ailleurs qu'une plante cultivée en l'absence de tout microorganisme pousse très difficilement et qu'elle est souvent moins résistante aux perturbations environnementales (sécheresse, attaque de pathogènes, pollution).

La biodiversité joue donc un rôle essentiel dans le développement des plantes. Or la forte anthropisation de notre environnement, la sélection des variétés cultivées et l'érosion des sols due à nos pratiques de culture réduisent fortement la diversité microbienne. Dans ce contexte, les plantes vont-elles finir à long terme par ne plus trouver dans le sol les microbiotes dont elles ont besoin?

De nombreuses recherches sur le microbiote des plantes sont encore nécessaires pour mieux comprendre les mécanismes régulant les interactions plantes-microorganismes. De nouvelles méthodes de culture plus productives et plus respectueuses de l'environnement sont sans aucun doute à la clé. Et peut-être un nouveau best-seller consacré au microbiote des plantes... ■

BIBLIOGRAPHIE

M. CREGGER ET AL., The *Populus holobiont*: dissecting the effects of plant niches and genotype on the microbiome, *Microbiome*, vol. 6(1), p. 31, 2018.

S. UROZ ET AL., Ecology of the forest microbiome: Highlights of temperate and boreal ecosystems, *Soil Biology and Biochemistry*, sous presse.

Y. COLIN ET AL., Taxonomic and functional shifts in the beech rhizosphere microbiome across a natural soil toposequence, *Scientific reports*, vol. 7(1), art. 9604, 2017.

M. JEANBILLE ET AL., Soil parameters drive the structure, diversity and metabolic potentials of the bacterial communities across temperate beech forest soil sequences, *Microbial Ecology*, vol. 71, pp. 482-493, 2016.

S. UROZ, Specific impacts of beech and Norway spruce on the structure and diversity of the rhizosphere and soil microbial communities, *Scientific Reports*, vol. 6, article 27756, 2016.