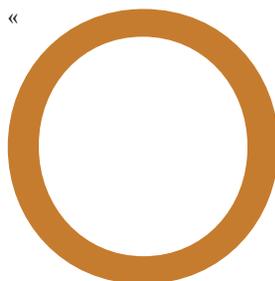


Une nouvelle stratégie d'amélioration agricole

Les racines des plantes vivent en interaction étroite avec des communautés microbiennes. La survie et la croissance des espèces végétales dépendent de cette symbiose, à tel point que les chercheurs envisagent de sélectionner ces communautés pour améliorer les plantes cultivées.



Manuel Blouin
PROFESSEUR
EN ÉCOLOGIE À
L'INSTITUT AGRO
DIJON
*Il est membre du
laboratoire de recherche
Agroécologie (Inrae -
Institut Agro, université de
Bourgogne).*



« *n a souvent besoin d'un plus petit que soi* ». L'adage de Jean de la Fontaine trouve un écho inattendu dans un champ de recherche qui en est encore à ses prémices : l'amélioration des cultures végétales par la sélection de leurs partenaires microscopiques, ces communautés microbiennes du sol regroupant bactéries, champignons et archées qui forment le microbiote racinaire. Prenons *Brachypodium distachyon*, une graminée modèle utilisée pour étudier la croissance des céréales en raison de son court cycle de vie. Notre équipe a démontré l'improbable : après cinq générations de sélection infructueuse du microbiote racinaire corrélé aux plantes les plus productives, la communauté microbienne finit par se stabiliser, et la croissance des plantes s'améliore significativement. Pour s'assurer du rôle exclusif du microbiote dans ce proces-

sus, nous avons transplanté celui-ci de génération en génération sur un même lot de graines : le microbiote évolue, mais pas la plante hôte. Et pourtant, l'effet positif du microbiote sur la croissance des graminées devient héritable et s'amplifie au fil des générations (1). Dès 2000, des biologistes américains prouvent que l'on peut accroître la biomasse des plantes en sélectionnant leur microbiote racinaire (2). La recherche sur cette « sélection par le microbiote » connaît aujourd'hui un fort engouement : depuis 2012, de nombreux spécialistes de biologie végétale ont mis en évidence tour à tour que la sélection du microbiote des plantes suffisait à augmenter leur tolérance à la sécheresse ou au sel, à modifier leur date de floraison ou encore à améliorer leur croissance ! À l'origine de ce changement de perspective agronomique, une meilleure connaissance des symbioses entre plantes et microorganismes du sol, fruit de plus d'un siècle de recherche. En 1885, le botaniste Albert Frank décrit la première mycorhize, cette symbiose liant un champignon aux racines d'une plante. Cette associa-

D.R.



INRAE - BFC / JULIEN MARTINET

▲ Les RhizoTubes®, en préservant le végétal, permettent de caractériser le système racinaire des plantes et la résultante des interactions entre plantes et microorganismes.

tion est répandue : 80 % des plantes terrestres développent des endomycorhizes, interactions intimes où les filaments du champignon se glissent entre paroi et membrane plasmique des cellules racinaires. Cette symbiose est obligatoire pour le champignon : il ne peut vivre sans la plante. La plante mycorhizée alloue 20 % du carbone fixé par la photosynthèse à « ses » champignons mycorhiziens. Un bon investissement quand on sait que les mycorhizes multiplient par 1 000 la surface d'échange de la plante avec le sol (6) ! Ainsi, jusqu'à 80 % de l'azote et du phosphore qu'elle assimile provient de ses symbiotes fongiques. Apparue il y a 450 millions d'années, la symbiose mycorhizienne s'est révélée cruciale pour que les plantes colonisent la terre ferme, à une époque où elles n'avaient pas de vrai système racinaire.

Les mycorhizes : un réseau complexe qui permet un échange nutritif, informatif et énergétique entre les plantes

Ces associations entre plantes et champignons ne s'arrêtent pas là : les mycorhizes forment un réseau complexe où chaque champignon relie les racines de plusieurs plantes qui échangent par ce biais nutriments, informations et énergie. Des plantes ayant perdu leur capacité de photosynthèse se développent ainsi grâce aux filaments fongiques, qui leur amènent à partir d'autres espèces végétales des molécules produites par la photosynthèse.

DES BACTÉRIES, SOUTIEN DES PLANTES

Si certains champignons du microbiote racinaire sont devenus indispensables aux plantes, ils ne sont pas les seuls : les bactéries sont tout aussi importantes. Chez les légumineuses, la fixation d'azote atmosphérique est réalisée dans des structures appelées nodules qui

hébergent des bactéries du genre *Rhizobium*. Lorsque *Rhizobium* colonise une racine, celle-ci développe des nodules. À l'intérieur, les bactéries sont confinées dans des vésicules sans dioxygène, ce qui optimise l'activité de l'enzyme bactérienne fixant l'azote atmosphérique, la nitrogénase. Vite identifiée puis cultivée, *Rhizobium* sera rapidement diffusée sous la forme d'inoculum auprès des agriculteurs qui l'utilisent, par exemple, pour aider à fixer l'azote de leurs légumineuses, un facteur de croissance important. Étonnamment, les mécanismes moléculaires responsables de structures aussi différentes que les mycorhizes ou les nodules reposent sur l'activation initiale de gènes communs à des familles botaniques éloignées.

UN RÔLE IMMUNITAIRE DE L'INTERACTION

Les symbioses entre bactéries du sol et végétaux ne se limitent pas à la fixation d'azote atmosphérique. Chaque plante émet des molécules par ses racines appelées exsudats qui attirent des microorganismes capables de lui fournir les minéraux dont elle a besoin. Azote, phosphore, potassium... Ces nutriments sont véhiculés soit par diffusion passive, soit par le flux d'eau qui va du sol vers la racine quand la plante transpire. Les biofilms bactériens qui recouvrent la surface racinaire permettent en outre à la plante de mieux supporter la sécheresse.

En plus de cette fonction nutritive, les symbioses entre plantes et bactéries du sol revêtent une fonction immunitaire, puisque les exsudats peuvent stimuler l'activité et la quantité de microorganismes protecteurs. Un des cas les plus étudiés concerne la protection du blé contre le champignon pathogène *Gaeumannomyces graminis*, responsable de la maladie appelée piétin-échaudage. Des études ont souligné l'efficacité de l'inoculation du sol par la bactérie *Pseudomonas fluorescens* dans la protection du blé contre cette maladie, probablement grâce au fait que la bactérie produise de nombreux antibiotiques (4).

Enfin, certaines hormones végétales, comme les auxines, sont émises par des bactéries du sol et influencent la croissance racinaire, facilitant leur infection. À l'inverse, d'autres hormones tels que l'acide jasmonique, l'éthylène

Le précieux coup de pouce des vers de terre

Vers de terre, collemboles ou nématodes influencent le développement des plantes par la production d'hormones végétales telles que l'auxine, probablement du fait de la stimulation de bactéries du sol. Produite au sommet de la plante et circulant via la sève jusqu'aux racines, l'auxine est en effet synthétisée par 80 % des bactéries. En activant ces bactéries, les vers de terre permettent à des plantes mutantes



▲ Les vers de terre aident certaines plantes à retrouver une croissance normale.

- l'*Arabidopsis thaliana* -, incapables d'approvisionner leurs racines en auxine, de retrouver une croissance normale (1). Comme dans les interactions plantes-microbes, l'unité de sélection semble dépasser la barrière de l'espèce dans les interactions plantes-animaux : nous avons montré qu'en plaçant seuls des plants de *Brachypodium distachyon* ou des vers de terre dans

trois sols différents, chacun conservait toujours une même sous-communauté de microbes du sol, appelée core-microbiote (2). Ce dernier était différent pour les vers seuls, pour les plantes seules... et dans l'association vers-plantes, qui développait son propre core-microbiote ! ■ M. B.

(1) R. Puga-Freitas et al., *PLoS One*, 7, e49504, 2012.

(2) S. Jacquiod et al., *Soil Biol. Biochem.*, 144, 107754, 2020.

ou l'acide salicylique permettent aux plantes de mieux résister à des pathogènes en induisant une résistance systémique, comme le ferait un vaccin. Les plantes « n'écourent » pas que les microorganismes, mais également des animaux, par exemple les vers de terre (lire l'encadré ci-dessus).

UN ENJEU ENVIRONNEMENTAL

À la lumière de la myriade de symbioses que tissent les plantes avec leur microbiote racinaire, l'amélioration des variétés cultivées jusqu'ici focalisée sur le génome de la plante pourrait élargir son champ d'investigation. Comme l'action des symbiotes ou pathogènes microbiens dépend très souvent des autres membres du microbiote auquel ils appartiennent, une nouvelle stratégie d'amélioration des plantes est de promouvoir ses communautés microbiennes racinaires les plus bénéfiques. Cette approche est d'autant plus pertinente en agronomie qu'un objectif majeur est de réduire l'utilisation des engrais de synthèse et des pesticides.

D'un point de vue plus fondamental, nos résultats font écho au concept d'holobionte. Ce terme désigne l'ensemble constitué par un

hôte pluricellulaire (ici, la plante) et sa communauté microbienne associée, vu comme une unité de sélection (5). Cette proposition titille la théorie classique de l'évolution établie par Darwin en remettant en cause le fait de s'intéresser soit à la plante, soit à chacune des espèces de son microbiote comme unités de sélection. En se restreignant à l'échelle de l'organisme individuel, cette approche traditionnelle néglige le fait que la survie et la croissance de ces espèces reposent en grande partie sur leurs interactions symbiotiques. Dans cette optique, Éric Baptiste propose de suivre non plus l'évolution des espèces en tant qu'entités isolées, mais l'évolution des processus qui sous-tendent leurs interactions (lire page 24). En sélectionnant tout à la fois, les plantes et le microbiote de *Brachypodium distachyon* afin d'améliorer un trait végétal, nos prochains travaux participeront à tester la validité du concept d'holobionte. ■

(1) S. Jacquiod et al., *Ecol. Lett.*, 25, 189, 2022.

(2) W. Swenson et al., *PNAS*, 97, 9110, 2000.

(3) M.-A. Selosse, *Jamais seul*, Actes Sud Nature, 2017.

(4) D.M., Weller et al., *Annu. Rev. Phytopathol.*, 40, 309, 2002.

(5) I. Zilber-Rosenberg et al., *FEMS Microbiol. Rev.*, 32, 723, 2008.