

L'ESSENTIEL

> Depuis plus de 400 millions d'années, les plantes et les champignons se rendent des services mutuels cruciaux.

> 5 % des espèces de plantes s'associent à des champignons ectomycorhiziens, qui entourent leurs racines d'un manchon.

> 80 % des espèces de plantes s'associent à des champignons

glomérormycètes, qui entrent dans les cellules racinaires et y forment des arbuscules.

> Les glomérormycètes ont rendu possible la sortie des eaux des algues, il y a environ 450 millions d'années, en les aidant à exploiter le sol.

> L'agriculture remplace par des engrais les apports habituels des champignons.

L'AUTEUR



MARC-ANDRÉ SELOSSE
mycologue et botaniste,
professeur au Muséum
national d'histoire
naturelle, à Paris

Sans les champignons, les plantes que nous connaissons n'existeraient pas ! Des champignons aident les plantes en les nourrissant et en les protégeant, en échange de produits de leur photosynthèse. Cette symbiose plante-champignon est à l'origine des écosystèmes terrestres actuels.

Au temps des colonies, les Européens ont tenté de faire pousser en Amérique du Sud et en Afrique des pins pour en faire des mâts de bateaux. Mais les semis échouaient : les plantules végétaient puis mouraient, ou survivaient sans croître... Vigoureux dans l'hémisphère Nord, les pins semblaient incapables de se nourrir sous les tropiques. Puis on découvrit qu'importer du sol européen restaurait la croissance normale des jeunes arbres : sans le savoir, on venait d'introduire les champignons européens sous les tropiques !

La survie de la plupart des plantes dépend en effet des champignons, au point que les pins, accompagnés de leurs champignons, sont devenus aujourd'hui envahissants sous les tropiques. Cette association à bénéfices mutuels entre végétaux et champignons est ancienne : elle date de plus de 400 millions d'années. Très actives, les recherches génétiques et paléontologiques permettent désormais de retracer l'évolution de cette symbiose.

Tout a commencé au Précambrien (avant 541 millions d'années) dans de minces communautés de microbes vivant à la surface des roches. Au sein de ces biofilms attestés par des microfossiles, certaines microalgues et bactéries étaient photosynthétiques tandis que d'autres se nourrissaient des premières. Ces biofilms se développaient à l'interface de l'air et du sol, et

accédaient d'un côté aux ressources minérales et de l'autre aux gaz et à la lumière. La biomasse ainsi formée restait toutefois très limitée.

Puis, à l'Ordovicien (485 à 443 millions d'années), de grandes algues sont sorties des eaux. Submergée, une algue trouve dans l'eau à la fois la lumière, les gaz (notamment le dioxyde de carbone, ou CO_2) et les sels minéraux (nitrate, phosphate, etc.) nécessaires à son alimentation. Elle n'a donc pas de racines, même si elle peut s'accrocher à un rocher. En revanche, survivre à terre signifie s'adapter à un milieu où les ressources sont compartimentées : les gaz et la lumière sont dans l'air ; l'eau et les minéraux sont dans le sol et, de surcroît, le plus souvent peu abondants.

On sait que les algues qui ont réussi cette adaptation sont sorties des eaux douces, car leurs plus proches parents actuels – les characées (une famille d'algues vertes) ou les spirogyres (des algues vertes filamenteuses) – y vivent toujours. Pour donner un âge à cette adaptation, l'équipe de Philip Donoghue, de l'université de Bristol, en Grande-Bretagne, a compté en 2018 les mutations accumulées au cours du temps dans ces différentes lignées, depuis leur ancêtre commun. Cette méthode, dite de l'horloge moléculaire, a daté la divergence entre les algues et les plantes terrestres à quelque 500 millions d'années.

Une fois à terre, les premières plantes ont produit bien plus de biomasse en exploitant les

➤ ressources du sol. Comment y sont-elles parvenues? Grâce à une association avec des champignons... Les fossiles correspondant à l'arrivée des tout premiers végétaux sur terre manquent malheureusement pour s'en rendre compte: les plus anciens connus consistent seulement en quelques cellules reproductrices vieilles de quelque 470 millions d'années: des spores.

Les plus anciennes plantes fossiles conservées ne datent que du Dévonien (419 à 359 millions d'années). Elles ont été découvertes à Rhynie, en Écosse. Là, quelque 400 millions d'années avant le charmant village écossais d'aujourd'hui, la précipitation rapide d'eaux hydrothermales chargées en silice, jaillissant des flancs d'un volcan, les a pétrifiées vivantes. Ensuite, miracle de conservation, elles n'ont été ni déformées ni altérées, si bien que nous pouvons en observer les organes figés. Pas de racines à l'époque, mais juste des tiges rampantes, dont les tissus périphériques abritent des filaments de champignon – des hyphes – qui pénètrent dans certaines cellules en se ramifiant (voir les figures ci-contre). La forme arrondie de ces cellules indique qu'elles étaient vivantes lors de la fossilisation. Ainsi, déjà à cette époque, des champignons du sol colonisaient les tissus des végétaux. On considère qu'ils apportaient de l'eau et des sels minéraux, exactement comme le font ceux d'aujourd'hui. Les végétaux sont devenus terrestres grâce à une symbiose avec les champignons.

L'UNE DES PLUS ANCIENNES PLANTES TERRESTRES

Une reconstitution d'*Aglaophyton major*, plante fossile vieille de quelque 400 millions d'années découverte à Rhynie, en Écosse, qui était dépourvue de feuilles et racines. Ses tiges rampantes abritaient des filaments de champignon. Sa forme a été restituée par des chercheurs de l'université d'Aberdeen.



Les plantes fossiles de Rhynie accueillait déjà de telles interfaces champignon-plante.

Les champignons exploitent aussi le sol pour la plante. Comment? En 2017, deux consortiums de chercheurs, l'un chinois, l'autre anglais, ont montré qu'en échange des ressources minérales issues du sol (eau, azote, phosphore et potassium), la plante fournit des sucres, mais aussi des acides gras. La forme filamenteuse des champignons les rend capables de se faufiler entre les obstacles pour un coût très limité: pour une même longueur, un filament de champignon représente en effet 100 fois moins de biomasse qu'une racine fine. Ces filaments, les hyphes, explorent le sol sur de grandes distances, multipliant le volume de sol exploité et prélevant les minéraux peu mobiles tels que le phosphate. Cette sous-traitance réduit drastiquement le coût biologique de l'extraction des ressources minérales pour les plantes, tandis qu'elle libère le champignon de la tâche de se procurer des sucres (voir l'encadré page 70).

Toutefois, l'alliance champignon-plante n'est pas seulement nutritionnelle: les partenaires se protègent aussi mutuellement. Ainsi, les plantes accueillent les réserves de certains glomérormycètes: ces champignons stockent des lipides au sein des racines, à l'intérieur de vésicules formées par le renflement d'un filament. À l'inverse, les plantes privées de champignons sont plus sensibles aux parasites et cela ne s'explique pas seulement par une alimentation réduite, mais par le fait que les champignons protègent activement la plante (et par-là leurs propres ressources) en produisant des toxines et des antibiotiques. Ils forment aussi un écran

SOUS-TRAITANTS DES PLANTES

Avec quels champignons? Très diverse, l'interaction plante-champignon concerne de nos jours 90% des plantes. Les racines colonisées par les champignons forment un organe mixte que l'on nomme la «mycorhize», du grec ancien *myco*, pour champignon, et *rhize*, pour racine. Le plus ancien type de mycorhize est formé par les champignons glomérormycètes (de *glomero*, pelote, et *myc*, champignon). Ce sont probablement déjà eux qui s'associaient avec les plantes de Rhynie. Pour autant, les travaux récents de Christine Strullu-Derrien, actuellement dans mon équipe au Muséum, suggèrent qu'un groupe voisin des glomérormycètes (les mucorormycètes, qui colonisent certaines plantes actuelles) a peut-être été aussi de la partie. Quoi qu'il en soit, le fait que plus de 80% des plantes actuelles soient associées aux glomérormycètes est un indice de l'ancienneté de cette symbiose. Et les partenaires des glomérormycètes sont divers, depuis les hépatiques, de petites plantes prostrées, aux plantes à fleurs en passant par les fougères.

Les glomérormycètes colonisent les racines en formant dans les cellules ces petites structures arborescentes que l'on nomme des arbuscules intracellulaires (voir la figure page 72).