

Les mycorhizes, une alliance plante-champignon découverte en 1885 et encore mal connue ?

Daniel WIPF*

Article rédigé par le secrétariat de rédaction
d'après l'enregistrement audiovisuel de cette communication.

Résumé

Il y a 450 millions d'années, les plantes ont colonisé le milieu terrestre. Pour cela, elles se sont associées notamment avec des microbes du sol. La symbiose la plus répandue dans le monde végétal est la mycorhize (mûkes/champignon et rhiza/racine), formée entre les racines et des champignons microscopiques du sol, les Gloméromycètes. Cette symbiose a été décrite pour la première fois en 1885 par le botaniste allemand Albert FRANK.

Ces champignons sont, pour les plantes, des alliés fantastiques. Ils facilitent l'absorption des éléments minéraux du sol et stimulent leurs défenses pour mieux résister aux maladies et plus largement aux stress (pollution, manque d'eau).

Après la seconde guerre mondiale, la politique agricole avait pour but de produire toujours plus afin de nourrir la population. Des solutions ont été mises en place : engrais, produits phytosanitaires, fongicides, insecticides. La production a augmenté, mais depuis peu, on se rend compte que la fertilité des sols s'est appauvrie et qu'il faut mettre toujours plus de ces produits.

La conférence présentera à travers plusieurs exemples les avancées de la recherche scientifique concernant la mycorhize et son rôle potentiel dans une agriculture durable.

Mots-clés : mycorhizes, arbuscules, champignons, plantes, symbiose mutualiste.

* Professeur Université de Bourgogne

UMR Agroécologie INRA1347/Agrosup/Université de Bourgogne, ERL 6300 CNRS - daniel.wipf@dijon.inra.fr

Introduction

Il y a 450 millions d'années, les plantes ont colonisé le milieu terrestre et formé des paysages. Dès leur sortie de l'eau, les plantes se sont associées à certains microorganismes du sol capables de les aider en leur facilitant l'accès à l'eau et aux éléments minéraux du sol, soit une symbiose mutualiste (à bénéfices mutuels).

Le sol et la mycorhize

Depuis 50 ans, quand on parle du sol, on évoque les caractéristiques chimiques, la structure, l'aération, les caractéristiques physiques et éventuellement le cycle des nutriments et c'est tout ce que l'on voyait dans un sol. Or, un sol, c'est un milieu bien plus complexe, extrêmement riche en microorganismes (bactéries, champignons, protozoaires, nématodes...). Dans un gramme de sol bien équilibré, on trouve des centaines de milliers de champignons au niveau individu et des millions de bactéries. Au sein de cette impressionnante biodiversité, il y a différentes relations : parasitisme, antibiose, compétition, synergie... Cet ensemble d'interactions, qui contribue aux cycles des nutriments, indique l'état sanitaire ou l'état de vie d'un sol. Pendant longtemps, on a dit qu'il fallait se débarrasser des pathogènes par des traitements mais sans s'occuper des microorganismes bénéfiques. Aujourd'hui, il faut favoriser les bénéfiques mais éliminer les pathogènes ; mais c'est oublier qu'ils participent également à l'équilibre du sol. En effet, un pathogène peut, par exemple, avoir un rôle dans le cycle du carbone ou de l'azote à un moment ou un autre. Ce rôle peut être important pour le fonctionnement du sol, on peut parler de biodiversité fonctionnelle¹. A un moment, le pathogène aura une fonction négative et à un autre moment, une fonction positive. Doit-on faire un bonus-malus ? c'est très difficile et à partir de quelle frontière du bonus-malus le microbe sera alors classé pathogène ou bénéfique. Pour comprendre comment cela marche, regardons de plus près les symbioses. En France, on a tendance à dire que

¹ Pour définir la biodiversité fonctionnelle, prenons comme exemple un groupe d'homo sapiens sapiens, donc tous de la même espèce, qui court un 100 mètres. Tous les individus n'arrivent pas en même temps sur la ligne d'arrivée, la fonction est là car chaque individu a ses points forts et ses points faibles. C'est à l'échelle de l'individu qu'il faut parler de biodiversité, de biodiversité fonctionnelle.

la symbiose est une association bénéfique mais FRANK (1877) et DE BARY (1879) donne comme définition : une association intime et durable entre deux organismes hétérospécifiques (espèces différentes). Il y a donc plusieurs possibilités dont :

- le parasitisme, l'une des espèces vit au dépend de l'autre
- le mutualisme, les espèces tirent toutes profit de la relation (interaction à bénéfice réciproque)
- une interaction neutre

Pour la mycorhize, un organe fait entre un champignon et une racine, il s'agit d'une association à long terme mutualiste mais à un instant donné, on peut avoir la vision d'un parasitisme quand le champignon est en train de prendre quelque chose à la plante et inversement. Dans le monde du vivant, tout peut très vite basculer et on le voit très bien quand on essaie de reconstituer ce genre d'association dans un tube. Quand tout va bien, chacun aide l'autre et puis lors d'un déséquilibre, soit le champignon, soit la plante se débarrasse de l'autre et l'équilibre est rompu.

Au niveau des connaissances, tout débute en 1885 quand le botaniste Albert FRANK décrit la première forme de mycorhize. Il existe deux grands types de mycorhizes :

- Ectomycorhizes, ces mycorhizes concernent exclusivement les espèces ligneuses, en majorité des arbres des zones tempérées. Le champignon ne pénètre pas dans les cellules de la plante mais produit deux types de structure :

- Les hyphes qui entourent simplement les racines en formant un **manteau** de mycélium qui a aussi un rôle de protection de la racine. La racine va perdre ses poils absorbants parce que l'absorption des nutriments se fait via le champignon
- Les hyphes se placent entre les parois des cellules de la racine, en formant le **réseau de Hartig**, pour augmenter la surface de contact entre les deux partenaires et ainsi augmenter les possibilités d'échange.

- Endomycorhizes à arbuscules, les plus répandues des mycorhizes. Les hyphes pénètrent l'intérieur des cellules et forment des structures ramifiées (les arbuscules) et parfois des structures de réserve (les vésicules).

Ces mycorhizes, il en existe d'ailleurs d'autres formes, sont apparues indépendamment au cours de l'évolution. Il y a 450 millions d'années, lorsque les plantes sont sorties de l'eau, l'endomycorhize est apparue. Des travaux du Professeur Dirk REDECKER, aujourd'hui basé à l'Université de Dijon (UMR Agroécologie), ont démontré la présence de spores fossiles de l'Ordovicien. L'hypothèse actuelle, est que ces champignons ont aidé la sortie de l'eau des plantes. Une symbiose bénéfique, ceci n'est pas démontré, pourrait être l'ancêtre de la mycorhize avec un champignon (*Geosiphon pyriformis*) qui englobe un filament de cyanobactéries (Nostoc) entraînant des échanges entre eux.

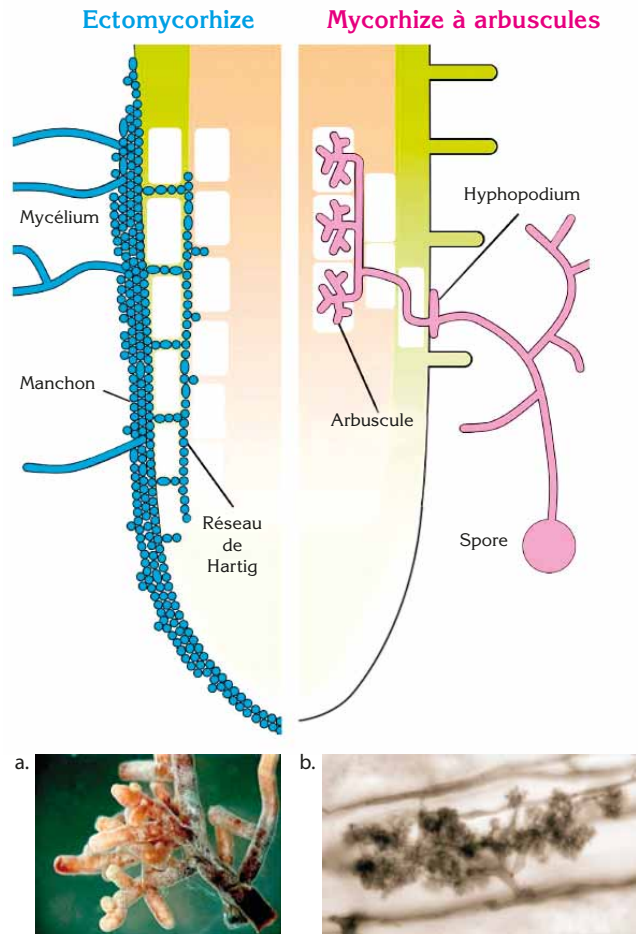


Figure 1. Représentation des deux grands types de mycorhizes (adapté de BONFANTE et GENRE, 2010).

- Photo d'ectomycorhizes d'Amanite tue-mouche (*Amanita muscaria*) © biomedcentral.com licence Creative Commons Paternité 2.5 générique
- Photo d'un arbuscule de Gloméromycète dans une racine d'*Arum italicum* observé par microscopie optique après coloration au bleu de Trypan (photo en sepia). V. Molinier (2008)



Photographie 1. Mycorhize à arbuscules. *Gigaspora margarita* (Gloméromycète) sur des racines de lotier (*Lotus japonicus*, Fabacées).

Dans l'ectomycorhize, le champignon (souvent un basidio- ou ascomycète) a besoin d'être en interaction avec l'arbre pour former la fructification que l'on appelle carpophore. Chacun peut vivre tout seul, la plante peut vivre sans le champignon et le champignon sans la plante mais sous forme de mycélium.

Les endomycorhizes à arbuscules concernent plus de 80 % des plantes terrestres et moins de 200 espèces de champignons appelés Gloméromycètes. Le champignon ne peut vivre sans la plante donc pour produire du champignon, et pour éventuellement l'utiliser comme on utilise des bactéries en agriculture, il faut une plante ou au moins des racines (culture *in-vitro*).

A quoi sert la mycorhize ?

La mycorhize est une association à bénéfice mutuel, donc chacun doit y trouver son intérêt. Le premier est de nourrir les deux partenaires que sont la plante et le champignon, il s'agit du bénéfice trophique. Le champignon, à l'inverse de la plante, ne sait pas faire de photosynthèse et ne sait donc pas fabriquer du sucre. Les plantes sont à l'origine de toute chaîne alimentaire car elles font du sucre grâce à l'énergie lumineuse. En condition de laboratoire, donc certainement surestimé, on estime que jusqu'à 20 % du sucre fabriqué par une plante par année peut être transféré au champignon. Sous un arbre, on a jusqu'à 800 kg de mycélium produit par an, cela donne donc une idée de ce qu'il faut fixer comme carbone pour fabriquer cette biomasse. L'avantage, c'est qu'un hyphe de champignon est beaucoup plus fin qu'une racine, donc faire un mètre d'hyphes est beaucoup moins coûteux en biomasse que faire un mètre de racine. Une plante avec un champignon comme partenaire sur ses racines va pouvoir explorer un volume de sol beaucoup plus important pour le même investissement. Par rapport à une plante seule, les estimations maximales montrent qu'une plante avec un champignon va explorer, dans les 3 dimensions, jusqu'à 1 000 fois plus de volume de sol, soit 1 000 fois plus de chance de trouver à manger et de l'eau. Grâce à des mécanismes particuliers, le champignon sait faire certaines choses que la plante a du mal à faire, comme accéder à l'azote organique. Le champignon apporte également une protection au système racinaire de la plante par :

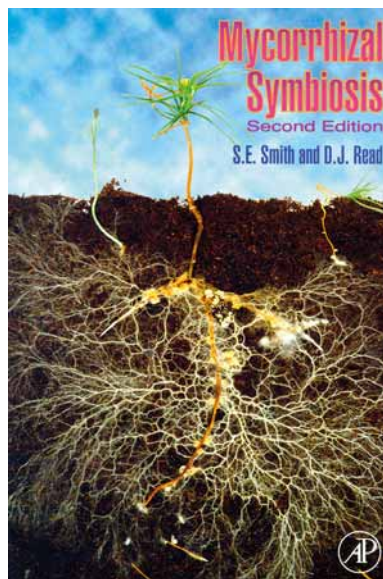
- Des phénomènes de compétition contre les autres micro-organismes du sol, le champignon prend une niche en prenant les nutriments
- Une protection mécanique grâce au manteau formé par les hyphes dans le cas de l'ectomycorhize
- Le stockage des métaux lourds

On n'a pas de protection directe des parties aériennes de la plante par la présence de la mycorhize. Mais la plante étant mieux nourrie grâce au champignon, elle est dans un meilleur état et peut probablement mieux faire face aux maladies. Plusieurs résultats au niveau génétique tendent à démontrer que la mycorhize active les défenses de la plante.

Le champignon a aussi d'autres rôles plus spécifiques comme par exemple dans le processus de germination de certaines semences d'orchidées.

On trouve la mycorhize dans tous les écosystèmes où il y a de la production végétale. Quelques rares familles de plantes terrestres ne forment pas de mycorhizes : les Brassicacées, les Caryophyllacées et les Chenopodiacées.

Le laboratoire d'Agroécologie de Dijon abrite la banque internationale des Glomales (www.i-beg.eu) en partenariat avec d'autres laboratoires. Il y a 41 souches de champignons en culture permanente et plus de 200 souches référencées.



Sur la couverture de cet ouvrage, on voit 3 plantes dont celle du centre qui a des petites boules sur ses racines, ce sont des ectomycorhizes et on voit les hyphes qui poussent dans le sol. On peut constater la différence avec les plantes n'ayant pas fait de mycorhizes : l'effet bénéfique sur la croissance de la plante ; le volume de sol exploré par la plante qui a un partenaire symbiotique.



Photographie 2. Différents morphotypes de spores. Banque internationale de Gloméromycètes (JMR Agroécologie) – www.i-beg.eu

Dans le développement des champignons formant des mycorhizes à arbuscules, le champignon rentre dans la cellule végétale et forme un arbuscule (forme de petit buisson) qui augmente la surface d'échange. Ensuite, on a la sporulation, la spore est relarguée dans le sol, germe et quand la spore a germé, très vite, elle rencontre une plante ou s'arrête. Elle peut s'arrêter une fois, deux fois mais après elle meurt. Il faut donc un contact avec le partenaire végétal, il s'agit là d'un obstacle pour l'utilisation actuelle de champignons en agriculture. Car si l'on pense les amener en même temps que la semence, il faut pouvoir s'assurer que la germination de la spore se réalise en même temps que la germination de la semence.

On a aussi un premier champignon qui peut connecter plusieurs plantes entre elles, un deuxième champignon qui peut connecter d'autres plantes entre elles dont certaines sont déjà connectées au premier champignon et on obtient ainsi un véritable réseau souterrain d'hyphes connectant plusieurs plantes entre elles que l'on appelle « wood-wide web ». Par ce réseau, on a démontré des échanges de nutriments de plantes à plantes à travers le champignon et de signaux aussi, comme l'information de l'attaque d'un pathogène sur une plante qui peut être transmise via le champignon aux autres plantes. Il a été démontré dans les forêts d'érables au Québec qu'avant l'apparition des feuilles des érables, un transfert de sucre avait lieu entre les Liliacées déjà en feuilles et ceux ci. On a vraiment un réseau d'entraide à travers ces champignons.

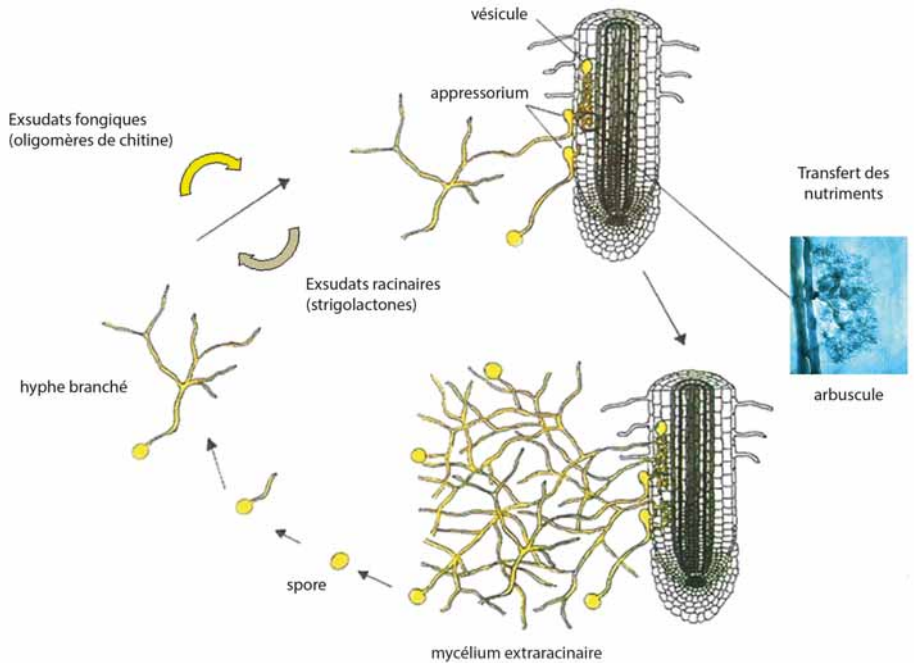


Figure 2. Etapes de la colonisation des racines par un champignon mycorhizien à arbuscules (adapté de BALESTRINI & LANFRANCO, 2006).

Dés 1982 à Dijon, sur un site de l'INRA à Bretonnière (Côte-d'Or), une expérience pionnière a été menée sur un sol classique en faisant pousser différentes cultures (comme l'oignon, le céleri...) avec différentes interventions sur le sol :

- en ne changeant rien au sol ;
- en désinfectant le sol avec aucun ajout ;
- en désinfectant le sol et puis avec un apport d'engrais phosphaté ;
- en désinfectant le sol et puis avec un apport d'une souche de champignon formant des mycorhizes à arbuscules.

L'expérience (photographie 3) a été répétée évidemment un grand nombre de fois. En restaurant un seul des organismes du sol, le champignon, on constate pratiquement le même développement qu'en mettant des engrais ou que sur la parcelle où rien n'a été changé. En raison de la crise du phosphate (quantité très limitée de phosphate biodisponible), ces recherches sont essentielles pour bien comprendre le sol et gérer son potentiel.

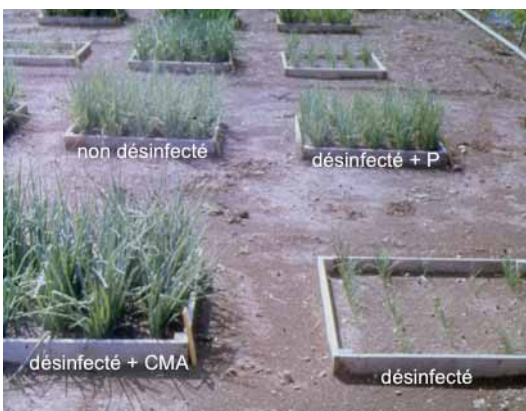
Les mycorhizes ont différents rôles :

Un rôle de biofertilisant

Les mycorhizes favorisent l'absorption par la plante des éléments minéraux du sol les moins mobiles (P, N, S, K, Cu, Zn). Sur la photographie 3, dans les mêmes conditions de culture, on constate que les plantes mycorhizées ont un meilleur développement. Avec différentes souches de champignons, on a différents résultats d'où la notion de biodiversité fonctionnelle.

Un rôle de protection

Les mycorhizes améliorent la résistance des plants aux stress abiotiques (métaux lourds, pesticides, ...) et biotiques (pathogènes). Sur la photographie 4, on constate la différence entre un framboisier non mycorhizé, qui présente des alté-



Photographie 3. Carrés de culture d'oignons utilisés dans une expérience visant à montrer le rôle des champignons mycorhiziens.

rations sur les feuilles, et un framboisier mycorhizé suite à l'introduction d'un pathogène qui pénètre au niveau racinaire *Phytophthora parasitica*. Malgré la mycorhize, le pathogène n'est pas éliminé mais juste contrôlé. La mycorhize n'a pas d'effet curatif mais préventif, il est inutile d'inoculer la plante une fois que la maladie est présente.



Photographie 4. Framboisiers, mycorhizé (à droite) et non mycorhizé (à gauche), inoculé avec *Phytophthora parasitica*

Un rôle de stabilisation des sols

En présence de mycorhizes, le réseau complexe et ramifié d'hyphes stabilise le sol et lutte ainsi contre l'érosion. Cette action peut être renforcée par l'excrétion par le champignon de glomaline, une glycoprotéine qui est une sorte de colle qui contribue à la stabilisation des agrégats. Les pertes dues au lessivage des sols sont aussi réduites dans ces conditions car l'eau s'écoule moins vite dans un sol plus compact.



Photographie 5. Rosiers, mycorhizé (à gauche) et non mycorhizé (à droite).

Une modification du métabolisme et de la physiologie de la plante

Les mycorhizes modifient l'équilibre hormonal de la plante. Sur la photographie 5, on constate l'effet de la mycorhize sur des rosiers placés dans la même chambre de culture.

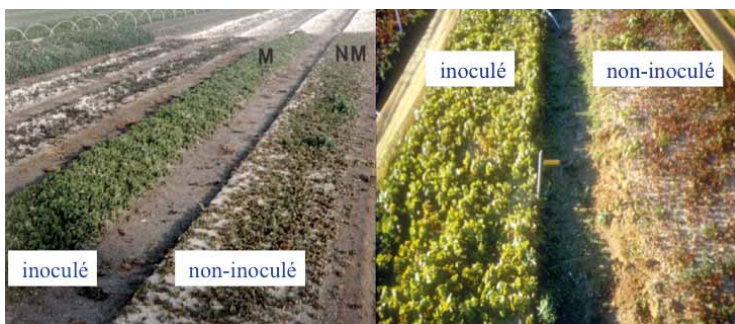
Mycorhization contrôlée en horticulture et agriculture, quelques exemples

Chez un pépiniériste qui avait des problèmes de production, la réinoculation d'un seul champignon dans une rangée sur deux a permis de rétablir la fonctionnalité du sol (photographie 6).

Un projet sur la patate douce, développé en Chine, a permis de montrer que la mycorhization entraînait une augmentation du rendement en production (+17,44 %). Des variétés répondent mais d'autres pas, il est important de bien analyser

pour bien comprendre ce que l'on fait. La mycorhization a eu également un effet sur la qualité avec une augmentation du taux de sucre (+14,03 %) et de carotène (+23,18 %). Cela paraît formidable, mais nous avons pris 3 champignons différents de la même espèce mais un seul a produit de tels résultats et cela démontre encore une fois la diversité fonctionnelle à l'échelle de l'individu. De plus, les résultats chinois ne sont pas forcément reproductibles à Dijon.

Pendant plusieurs années, des recherches sur la production d'oignon mycorhizé ont été menées avec Dijon Céréales. On a travaillé sur la composition en produits soufrés car l'être humain n'est pas capable d'en produire et nous avons besoin des plantes pour les ingérer par l'alimentation. En fonction des champignons, nous avons obtenu des résultats variables mais le plus intéressant est l'augmentation de la quantité des composés soufrés lorsque l'on diminue l'apport d'engrais azoté de 50 %. Quand on réduit l'apport d'engrais et que l'on inocule avec une certaine souche de champignon, on augmente la qualité du produit final. La question est : combien êtes-vous prêt à perdre en quantité si vous avez un gain en qualité ?



Photographie 6. Réinoculation d'un champignon dans une pépinière, une rangée sur deux, sur des cultures de Liquidambar et de Vigne vierge.

Bibliographie

BALESTRINI R. & LANFRANCO L. 2006. Fungal and plant gene expression in arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza* 16(8): 509-524.

BONFANTE P. & GENRE A. 2010. Mechanisms underlying beneficial plant-fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature Communications* 1. doi:4810.1038/ncomms1046



Vous pouvez retrouver cette communication en vidéo sur le site internet bourgogne-nature.fr
> Médiathèque > Vidéothèque