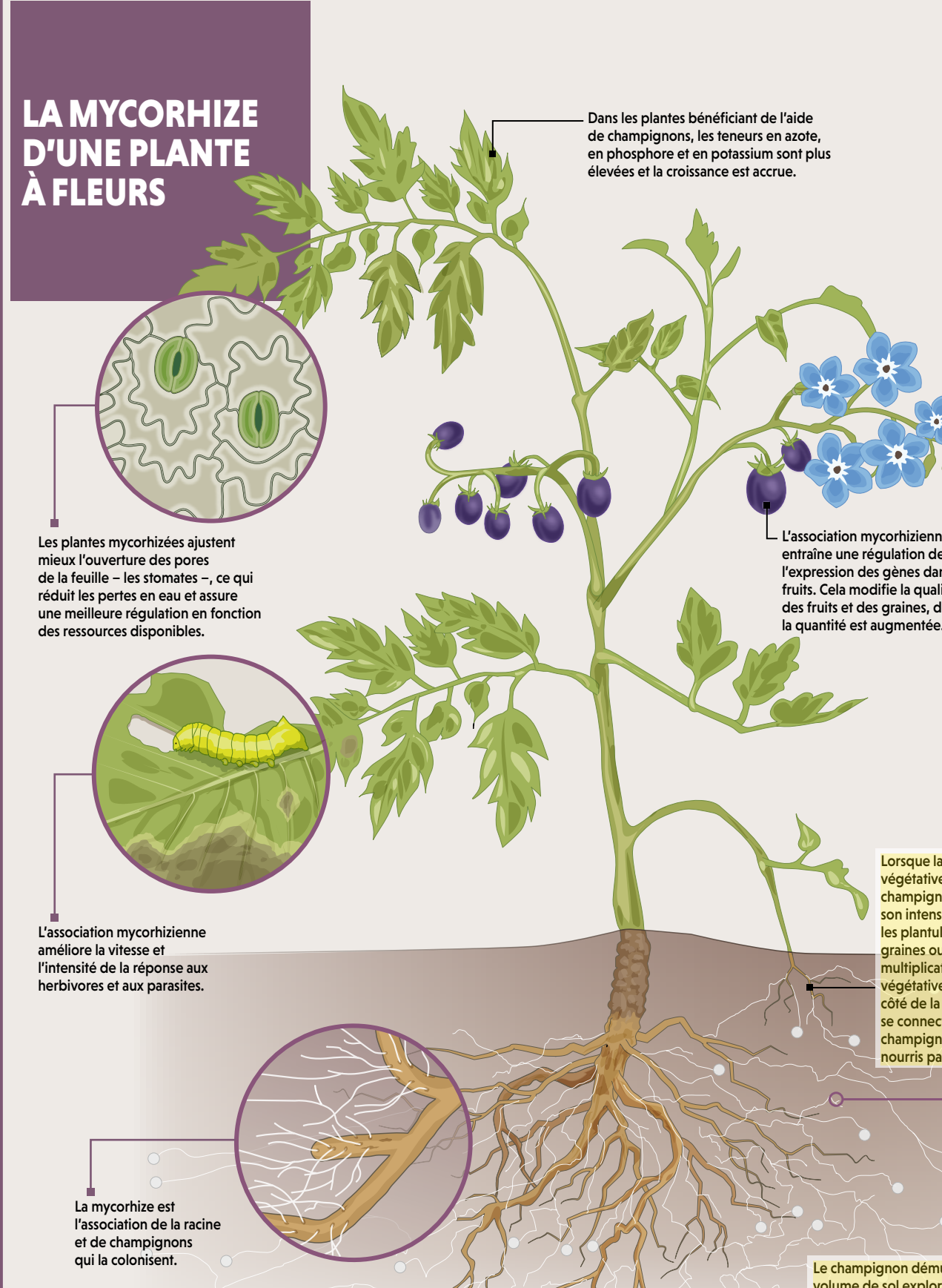


LA MYCORHIZE D'UNE PLANTE À FLEURS



Les plantes mycorhizées ajustent mieux l'ouverture des pores de la feuille – les stomates –, ce qui réduit les pertes en eau et assure une meilleure régulation en fonction des ressources disponibles.

L'association mycorhizienne améliore la vitesse et l'intensité de la réponse aux herbivores et aux parasites.

La mycorhize est l'association de la racine et de champignons qui la colonisent.

Dans les plantes bénéficiant de l'aide de champignons, les teneurs en azote, en phosphore et en potassium sont plus élevées et la croissance est accrue.

L'association mycorhizienne entraîne une régulation de l'expression des gènes dans les fruits. Cela modifie la qualité des fruits et des graines, dont la quantité est augmentée.

Lorsque la multiplication végétative existe, les champignons modulent son intensité; de plus, les plantules issues de graines ou de multiplication végétative germant à côté de la plante mère se connectent à des champignons déjà nourris par celle-ci.

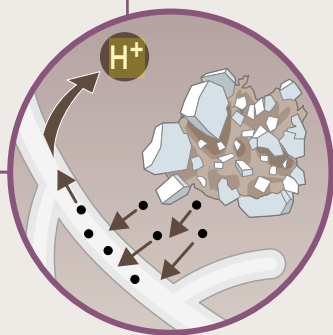
Le champignon démultiplie le volume de sol exploré et, dans le cas des glomérormycètes, y produit des spores qui, avec les hyphes, infecteront d'autres racines.

Spores

Ce dessin représente une plante qui, comme 80 % des végétaux, vit en symbiose avec des glomérormycètes, champignons dont les filaments – les hyphes – sont capables d'exploiter les minéraux du sol. D'autres végétaux, les pins par exemple, s'associent à des communautés de champignons ectomycorhiziens, qui sont non seulement capables de prélever les minéraux du sol, mais aussi de profiter des restes organiques qui s'y trouvent. La racine colonisée par les champignons forme la mycorhize, organe mixte nourricier à la fois pour la plante et le champignon. Dans le cas des glomérormycètes, les échanges se produisent sur des structures constituées par les hyphes du champignon au sein des cellules racinaires : les arbuscules. Au niveau de la surface des arbuscules, les champignons reçoivent des sucres et la plante obtient en retour l'eau et les sels minéraux que le champignon puise loin dans le sol grâce à ses hyphes. Dans le cas des champignons ectomycorhiziens, les échanges se font à la surface de la racine, que les champignons entourent d'un manchon.

L'association mycorhizienne favorise la floraison et la production de nectar, et ainsi une meilleure reproduction sexuée.

Le champignon dissout les minéraux du sol en l'acidifiant localement et se procure ainsi du phosphore et du potassium ; ce mécanisme est encore plus actif dans le cas des champignons ectomycorhiziens.



Grâce à des enzymes, le champignon mobilise dans les restes organiques présents dans le sol l'azote et le phosphore organiques. Ce mécanisme est surtout actif chez les champignons ectomycorhiziens.



> d'Exeter, en Angleterre, suggèrent que l'altération des roches par la symbiose plante-champignon explique 80% de la chute de concentration atmosphérique du CO₂ lors de la sortie des eaux des algues, il y a environ 500 millions d'années. Le recul de l'effet de serre a culminé vers 460 millions d'années avec la grande glaciation de l'Ordovicien. L'emballement de l'altération des roches et de la photosynthèse aurait aussi contribué à une glaciation vers la fin du Dévonien (359 millions d'années). Ces deux glaciations se sont accompagnées d'extinctions massives d'espèces.

D'AUTRES MYCORHIZES

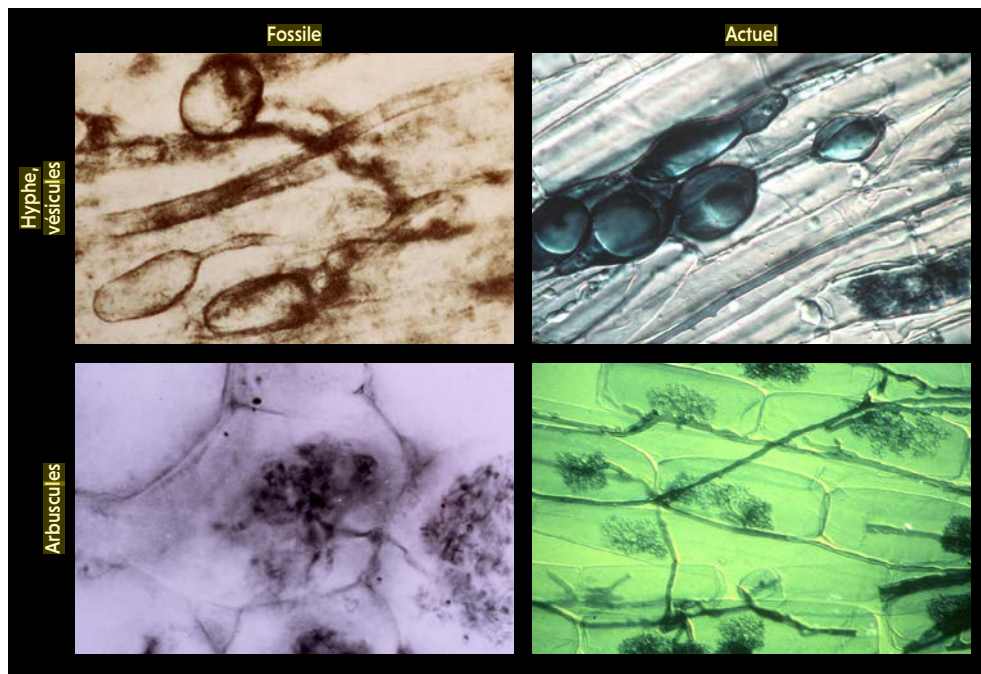
Si la plupart des plantes ont gardé des mycorhizes à glomérormycètes, de nouveaux types de mycorhizes sont aussi apparus, en particulier les ectomycorhizes (du grec *ecto*, dessus), où le champignon forme un manchon autour de la racine et pénètre entre ses cellules superficielles (voir la figure page 69). Ce sont ces ectomycorhizes qui manquaient aux pins des premiers Européens sous les tropiques ! Ces nouveaux types de mycorhize comprennent des champignons ascomycètes et basidiomycètes, dont les ancêtres étaient des saprophytes, qui s'alimentent partir de la matière organique en décomposition. Beaucoup sont demeurés saprophytes tandis que d'autres sont devenus mycorhiziens.

Les champignons ectomycorhiziens comptent plusieurs groupes d'ascomycètes (truffes, ou certaines pèzizes) et de basidiomycètes. Ces derniers incluent les champignons dotés de sporophores, c'est-à-dire d'organes charnus producteurs de spores en surface, par exemple formés d'un pied et d'un chapeau et formant leurs spores sur des lamelles ou des tubes. Il s'agit là de ces structures que nous nommons communément « champignons » (voir la photographie page 66) et dont font partie les amanites, les lactaires, les cèpes, etc.

Les plus vieilles ectomycorhizes fossiles connues ont 50 millions d'années, mais ce type d'association plante-champignon serait apparu bien avant, au moins au Trias (252 à 201 millions d'années) avec les conifères. Outre les premiers pins, une quinzaine de lignées de plantes à fleurs ont adopté, indépendamment les unes des autres, l'ectomycorhize, notamment certaines légumineuses (tels les acacias), ou les fagacées de nos forêts (hêtres, chênes, châtaigniers...). Du côté du champignon aussi, divers groupes d'ascomycètes et de basidiomycètes sont devenus ectomycorhiziens : cela s'est produit plus de 80 fois indépendamment ! C'est donc une convergence évolutive multiple qui a mis en place un ensemble de partenaires compatibles entre eux.

La plupart des groupes ectomycorhiziens actuels ont émergé il y a moins de 60 millions >

Les symbioses à arbuscules existent depuis les origines de la flore terrestre (à gauche, les fossiles de Rhynie, 400 millions d'années) et dominent dans la flore actuelle (à droite, une racine de maïs actuel). Dans les deux cas, on voit des filaments (hyphes) de champignons qui entrent dans certaines cellules et se ramifient pour former ce que l'on nomme des arbuscules ou des renflements (vésicules) stockant des réserves.



GÉNÉTIQUE MYCORHIZIENNE

Le séquençage des génomes de champignons ectomycorhiziens explique comment sont apparues les ectomycorhizes. Conduits notamment sous l'égide de Francis Martin, de l'Inra à Nancy, ces séquençages révèlent deux choses. D'une part, que le champignon a perdu les gènes des enzymes permettant à ses parents non mycorhiziens de digérer la matière végétale (il devient donc dépendant de la plante qui le nourrit en sucres) ; d'autre part, que ces champignons ont acquis de nombreux gènes codant de petits peptides sécrétés, dont certains, entrant dans les tissus racinaires, les rendent plus tolérants à la colonisation. Parce qu'elle se réalise facilement, la régression génétique évoquée ici explique sans doute les fréquentes apparitions évolutives et réapparitions des groupes de champignons ectomycorhiziens. Elle explique aussi pourquoi parmi ces groupes, aucune espèce n'est retournée à la vie libre, en saprophyte, ce qui nécessiterait beaucoup de gènes perdus.

> d'années, en particulier après le refroidissement climatique majeur de la transition Éocène-Oligocène, il y a 34 millions d'années. Deux raisons suggèrent un lien des plantes ectomycorhiziennes avec ce refroidissement. Premièrement, ces champignons ont gardé de leurs ancêtres saprophytes la capacité à mobiliser l'azote et le phosphore de la matière organique, ce qui favorise l'alimentation dans des climats froids où la matière organique se dégrade plus lentement. Deuxièmement, comme leurs capacités d'altération des roches sont plus grandes, ils parviennent à compenser la moindre dissolution des minéraux lorsque la température est basse. En revanche, ils sont deux à trois fois plus coûteux en sucre pour la plante hôte, ce qui explique que l'ectomycorhize ne domine pas dans tous les environnements.

La capacité accrue des ectomycorhizes à altérer les roches a encore amplifié la séquestration du CO₂ sous la forme de carbonates sédimentant au fond des mers. Ce phénomène a refroidi durablement le climat et a culminé dans les nombreuses glaciations de ces derniers millions d'années.

LA SYMBIOSE MYCORHIZIENNE A CHANGÉ LA FACE DE LA TERRE

Ainsi, la symbiose mycorhizienne a façonné les écosystèmes terrestres d'aujourd'hui. Auparavant, les grandes algues n'avaient pu coloniser la terre ferme. Au cours de l'histoire évolutive qui a suivi cette colonisation, la flore terrestre a poursuivi sa diversification, parfois avec de nouvelles mycorhizes, tandis que d'autres plantes ont perdu l'interaction avec les champignons. C'est par exemple le cas des

mousses qui se cantonnent à la surface du sol et supportent l'absence d'eau, au prix d'un développement limité. D'autres plantes ont évolué en exploitant le sol de façon autonome grâce à leurs racines. Par exemple, les espèces des familles du quinoa (chénopodiacées), de l'oseille (polygonacées) ou du chou (brassicacées) se passent de mycorhize. Les travaux récents de Jean-Michel Ané, de l'université de Madison, au Wisconsin, montrent que ces plantes ont perdu les gènes permettant la formation des mycorhizes à glomérormycètes. L'une des plantes dépourvues de mycorhize est l'arabette des dames, *Arabidopsis thaliana*, la plante modèle la plus fréquente dans les laboratoires. Son étude intensive a donc longtemps minoré l'importance des champignons pour le monde végétal. Les plantes non mycorhizées ne représentent qu'environ 10% des espèces; elles sont surtout cantonnées à des milieux particuliers: des sols riches ou humides, où l'accès aux ressources minérales est facile à la plante seule, ou des milieux pionniers d'où les champignons sont absents...

Pour avoir perduré si longtemps, la symbiose plante-champignon a dû être stable. Au fil du temps sont sûrement apparus des tricheurs, c'est-à-dire des champignons ou des plantes moins généreux envers leurs partenaires. Économisant leurs ressources, ces tricheurs auraient dû remplacer peu à peu les individus qui aident davantage leur partenaire. Certaines observations suggèrent que des tricheurs existent bien: selon l'espèce de champignon mycorhizien présente, une plante peut pousser mieux ou moins bien que si elle n'est pas mycorhizée. Dès lors, comment